

На правах рукописи



КУЗЬМИН СЕРГЕЙ РУДОЛЬФОВИЧ

**ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ В СИБИРИ**

**Специальность 4.1.6. – Лесоведение, лесоводство, лесные культуры,
агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация
(биологические науки)**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук**

Красноярск – 2024

Работа выполнена в Институте леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛ СО РАН) – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Научный консультант: **Ваганов Евгений Александрович**, доктор биологических наук, профессор, академик РАН, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», научный руководитель СФУ

Официальные оппоненты: **Воронин Виктор Иванович**, доктор биологических наук, ФГБУН Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, директор

Бессчетнов Владимир Петрович, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», заведующий кафедрой «Лесные культуры»

Буторова Ольга Федоровна, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», профессор кафедры селекции и озеленения

Ведущая организация: ФГБУН Институт лесоведения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «02» октября 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.228.05, созданного на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50/28, конференц-зал ИЛ СО РАН. Тел./факс: (391) 243-36-86; E-mail: institute_forest@ksc.krasn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЛ СО РАН и на сайте организации <http://forest.akadem.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор биологических наук, доцент



Гродницкая Ирина Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Проблема восстановления лесов является одной из главных для всего мирового лесоводства. Многочисленные лесные пожары, массовые поражения грибными патогенами и вредителями приводят к значительному сокращению лесопокрытой площади, снижению биоразнообразия. По прогнозу в ближайшие 50 лет в Средней Сибири предполагается уменьшение площади сосновых лесов на 33 % (Соколов и др., 2017). Одной из форм компенсации утраченных лесных площадей является лесовосстановление на основе селекционно-лесокультурных работ, в том числе исследования географических культур. Оценка внутривидовой дифференциации сосны обыкновенной в географических культурах является эффективным методом изучения эколого-географической изменчивости вида и отбора наиболее подходящих для лесного хозяйства происхождений (Правдин, 1964; Райт, 1978; Патлай, 1984; Giertych, 1991; Matyas, 1996). Изучение первых серий географических культур в России показало надежность метода в исследовании внутривидовых категорий, формового разнообразия и установлении генетической ценности селекционного материала. Прямой отбор перспективных климатических экотипов (климатипов) на устойчивость, быстроту роста и стволовую продуктивность является эффективным методом в лесной селекции (Правдин, Вакуров, 1968; Патлай, 1974; Ирошников, 1977а; Нарышкин и др., 1983; Проказин, Куракин, 1983; Черепнин, 1999).

В настоящее время особую актуальность в решении современных задач в лесовосстановлении приобретают географические культуры последней государственной серии, созданные в 1976–1977 гг. (Шутяев, Вересин, 1990; Редько, 1994; Мерзленко, Мельник, 1995; Тараканов и др., 2001; Чернодубов и др., 2005). Корректировка лесосеменных районов и обоснованный выбор географических происхождений являются научной основой рационального использования семенного материала при лесовосстановлении и создании устойчивых, продуктивных плантаций и лесных культур (Родин, Проказин, 1997; Rehfeldt et al., 2002; Наквасина и др., 2008; Раевский, 2015).

Цель работы: оценка внутривидовой изменчивости и дифференциации климатипов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в географических культурах как научной основы для отбора перспективных климатипов и уточнения лесосеменного районирования в Средней и частично Восточной Сибири.

Задачи:

1. Изучить динамику сохранности, роста в высоту и показатели стволовой продуктивности у климатипов сосны в разных лесорастительных условиях в географических культурах.

2. Оценить динамику годовых радиальных приростов и структуру древесины у контрастных по месту происхождения климатипов сосны в разных пунктах испытания и оценить степень их дифференциации.

3. Изучить изменчивость климатипов по морфолого-анатомическим и биохимическим показателям хвои, параметрам шишек и массе семян.

4. Оценить дифференциацию климатипов сосны по восприимчивости к грибным болезням.

5. Выявить степень влияния климатических и географических характеристик материнских насаждений на рост, ассимиляционный аппарат и древесину у потомств сосны обыкновенной в пункте испытания.

6. Оценить успешность роста сосны разного происхождения и провести отбор перспективных климатипов по комплексу показателей в разных лесорастительных условиях в географических культурах.

7. Разработать практические рекомендации по перемещению семян сосны обыкновенной и использованию перспективных климатипов в регионе.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дифференциация климатипов сосны обыкновенной по комплексу лесоводственно-таксационных показателей обусловлена наследственными особенностями климатипов и разной адаптивной реакцией на экологические факторы в пункте испытания.

2. Морфолого-анатомические, физиологические и биохимические показатели хвои, размеры шишек, масса семян, толщина и площадь клеточной стенки трахеид древесины являются дополнительными диагностическими признаками при оценке дифференциации климатипов сосны.

3. Сходство климатических и почвенных условий места происхождения климатипов и пункта их испытания и особенности морфолого-анатомических, физиологических и биохимических показателей хвои (плотность устьиц, продолжительность жизни хвои, охвоенность, содержание летучих веществ) являются критериями устойчивости климатипов сосны к грибным патогенам в географических культурах.

4. Оценка роста и состояния сосны разного происхождения в географических культурах по комплексу лесоводственно-таксационных показателей позволяет выделить группы климатипов со сходными значениями усредненного показателя (критерия успешности роста), являющегося основой выделения лесосеменных районов и объективного отбора перспективных климатипов.

Научная новизна и теоретическая значимость. Впервые в географических культурах сосны обыкновенной последней государственной серии, достигших 40-летнего возраста, выявлены закономерности изменчивости ростовых показателей, сохранности и устойчивости к экологическим факторам.

Продемонстрировано влияние лесорастительных условий, в частности почвенных, на сохранность, рост в высоту и стволовую продуктивность климатипов сосны обыкновенной в пункте испытания географических культур. Использован комплекс морфолого-анатомических и биохимических показателей хвои, структуры древесины, параметров шишек и массы семян для оценки дифференциации сосны обыкновенной в географических культурах. Показана дифференциация климатипов сосны по устойчивости к грибным патогенам в условиях географических культур в Сибири. Разработаны критерии отбора перспективных климатипов кандидатами в сорта-популяции в разных лесорастительных условиях в географических культурах на основе комплекса показателей. Уточнены лесосеменные районы на территории Сибири на основе оценки дифференциации и успешности роста климатипов сосны обыкновенной в географических культурах.

Практическая значимость работы. На основе выполненных автором исследований или при его участии разработаны практические рекомендации по уточнению лесосеменного районирования в регионе. Материалы по уточнению

«Лесосеменного районирования...» (1982) переданы в координационный совет при ВНИИЛМ в 2011 г. и были включены в разработку действующего лесосеменного районирования (Приказы Рослесхоза 2015–2016 гг.). Материалы с уточнением действующего лесосеменного районирования (2015 г.) переданы в 2021 г. в Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Разработаны рекомендации по использованию перспективных климатипов – кандидатов в сорта-популяции. В порядке практического внедрения рекомендаций созданы испытательные культуры из шести климатипов – кандидатов в сорта-популяции в условиях Красноярской лесостепи на территории э/х «Погорельский бор» Института леса им. В.Н. Сукачева (ИЛ СО РАН). Разработанные рекомендации могут использоваться при лесовосстановлении и создании продуктивных устойчивых плантаций и лесных культур сосны обыкновенной в регионе.

Апробация результатов. Результаты исследований и основные положения, выносимые на защиту, доложены на 30 отечественных и международных совещаниях и конференциях **в России:** Международная конференция молодых ученых «Леса Евразии – Белые ночи» (Санкт-Петербург, 2003), конференции молодых ученых «Исследования компонентов лесных экосистем Сибири» (Красноярск, 2003–2009, 2017), Международная конференция «Влияние изменений климата на бореальные и умеренные леса» (Екатеринбург, 2006), Международные совещания по сохранению лесных генетических ресурсов (Барнаул, 2007, 2015; Новосибирск, 2009; Красноярск, 2011; Пушкино, 2022), Всероссийская конференция «Дендрэкология и лесоведение» (Красноярск, 2007), Всероссийская конференция «Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса» (Красноярск, 2009), Международный семинар, посвященный влиянию изменения климата на лес и сельскохозяйственные экосистемы (Красноярск, 2012), Всероссийская научно-практическая конференция «Интенсификация лесного хозяйства России: проблемы и инновационные пути решения» (Красноярск, 2016), Международные научные конференции «Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений» (Красноярск, 2018, 2019, 2022), VI Международный симпозиум им. Б.Н. Уголева «Строение, свойства и качество древесины – 2018» (Красноярск, 2018), Всероссийская конференция «Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски» (Красноярск, 2019) и **за рубежом:** международные конференции, совещания (IUFRO – Венгрия, 2007; «Факторы экспериментальной эволюции организмов» – Украина, 2009, 2010; EGU – Австрия, 2013; IUFRO – Чехия, 2014; «Сохранение лесных генетических ресурсов» – Беларусь, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 научная статья в изданиях, рекомендованных ВАК (или приравненных к ним) для докторских диссертаций. Общее количество опубликованных научных работ: 105.

Личный вклад автора. Экспериментальные данные, использованные в диссертации, получены при личном непосредственном участии автора на всех этапах работы (формулировка задач, постановка экспериментов, инвентаризация географических культур, камеральная и статистическая обработка материалов, анализ результатов, подготовка публикаций). Материалы 1976–1999 гг. для анализа динамики роста, состояния и сохранности климатипов сосны получены из фондов лаборатории лесной генетики и селекции ИЛ СО РАН.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 443 страницах и включает 125 рисунков и 39 таблиц. Работа состоит из введения, 7 глав, выводов, заключения, практических рекомендаций, списка сокращений, списка литературы (включающего 571 источник, в том числе 164 источника на иностранных языках) и 6 приложений на 52 страницах.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному консультанту – д.б.н., проф., академику РАН Е.А. Ваганову, научному наставнику – д.б.н., проф. Л.И. Милютину за ценные советы и поддержку. Особую признательность автор выражает соавторам и коллективам лабораторий лесной генетики и селекции и структуры древесных колец ИЛ СО РАН за сотрудничество, помощь и поддержку на разных этапах работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проектов РФФИ (08-04-90001; 11-04-00246; 11-04-00033; 11-04-00063; 11-04-92226; 14-04-31366; 15-44-04132; 16-05-00496; 20-05-00540), в том числе совместно с Красноярским краевым фондом поддержки научной и научно-технической деятельности (16-44-243031), Министерства образования и науки РФ (проекты СФУ: 1.7.09; 4.4290.2011), базовых проектов ИЛ СО РАН (0356-2016-0708; 0356-2019-0024).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Внутривидовая дифференциация сосны обыкновенной (обзор литературы)

В главе рассматриваются вопросы, связанные с изучением внутривидовой изменчивости и систематики сосны обыкновенной. Обсуждаются вопросы влияния происхождения семян на рост культур. Приводятся результаты исследования географических культур как объектов, создаваемых для оценки изменчивости наследственных особенностей и адаптации растений к различным факторам среды и отбора перспективных климатипов в разных пунктах испытания. Рассматриваются вопросы, связанные с правилами перемещения семян на разных территориях ареала вида. Приводятся и обсуждаются данные научной литературы по изменчивости показателей ассимиляционного аппарата, генеративных органов, структуры древесины у сосны обыкновенной. Рассматриваются болезни, вызываемые грибными патогенами и факторы, влияющие на устойчивость сосны к ним.

ГЛАВА 2. Объекты и методы исследований

Основной объект исследований – географические культуры (ГК) сосны обыкновенной, созданные в 1977 г. в Богучанском лесничестве Красноярского края под руководством сотрудников лаборатории лесной генетики и селекции Института леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, А.И. Ирошниковым и Н.А. Кузьминой. При создании и изучении ГК использовались программа и методика ВНИИЛМ (Изучение имеющихся ..., 1972). Географические культуры созданы из 83 климатипов на двух экспериментальных участках с разными почвенными условиями. Первый участок, площадью 15 га расположен на дерново-подзолистой песчаной почве с маломощным гумусовым горизонтом (до 3 см), тип леса сосняк бруснично-толокнянковый, состав древостоя – 10С. Второй участок, площадью 9 га, размещен на старой залежи, поверхность участка ровная, почва темно-серая лесная суглинистая с мощным гумусовым горизонтом (до 40 см), тип леса – сосняк

разнотравный с составом 9С+1Л. Посадка 3-летних сеянцев проводилась под меч Колесова, рядами, с размещением 1.5×0.75 м.

Исследование сохранности и показателей стволовой продуктивности. Анализируются материалы инвентаризаций географических культур сосны обыкновенной, проводимые в среднем каждые 5 лет по методике ВНИИЛМ (Изучение имеющихся ..., 1972). Использовались методические рекомендации А.И. Ирошниковой (1974), А.М. Шутяева и М.М. Вересина (1990), А.И. Чернодубова с соавт. (2005), М.Д. Мерзленко с соавт. (2017). Сохранность климатипов оценивалась методом сплошного учета живых, поврежденных и мертвых деревьев. Объем выборки для определения средних высот и диаметров составлял в первые 15 лет по 100 растений, в последующие годы по 50. Форма ствола определялась по доле прямоствольных деревьев. Средний объем ствола и другие биометрические показатели оценивались по методикам С.А. Шевелева с соавт. (Лесотаксационный справочник ..., 2002), Н.П. Анучина (1982). Класс бонитета определяли по бонитировочной таблице М.М. Орлова, шкала выравненная и дополненная (Швиденко и др., 2008). Сравнительная оценка реакции ширины годичного кольца (ШГК) и доли поздней древесины (ДП) на погодные условия проводилась с помощью анализа коэффициентов корреляции между индексными значениями исследуемых параметров и погодными данными, источником которых был проект «Европейская оценка и база данных климата» (www.ecad.eu). ШГК измерялась в соответствии с принятой методикой (Rinn, 1996) на полуавтоматической установке LINTAB V – 3.0, с использованием стереомикроскопа «Leica MS5» (Германия). Исследование анатомических характеристик древесины проводилось с помощью различных программ и методов (Vaganov, 1990; Park, Spieker, 2005; Силкин, 2005; Кузьмин и др., 2008, 2010, 2011; Силкин, Екимова, 2011; Кузьмин, Роговцев, 2016).

Исследование хвои. Методика сбора хвои зависела от поставленной цели. При оценке географической изменчивости сбор хвои проводился у 65 климатипов в условиях песчаной почвы и у 35 в условиях суглинистой. Исследование эндогенной изменчивости и плотности устьиц изучалось у трех контрастных по месту происхождения климатипов. Анализ погодичной изменчивости морфологических признаков выполнен на хвое 1–3-летнего возраста у пяти деревьев каждого климатипа. Продолжительность жизни хвои изучалась на осевом и боковых побегах первого порядка. При сборе и анализе показателей хвои и шишек использовались методические рекомендации С.А. Мамаева (1973), дополненные собственными наработками (Кузьмина, Кузьмин, 2007а; Кузьмин и др., 2009, 2012).

Исследование компонентного состава летучих веществ и фенологии развертывания хвои. Состав летучих веществ изучался у 11 климатипов из разных географических регионов и разной устойчивостью к грибным патогенам. Общее число исследованных деревьев для группы устойчивых – 55, неустойчивых – 60. Средняя выборка для климатипа – 10 деревьев. Получение эфирного масла, качественное и количественное определение компонентного состава летучих соединений в образцах хвои на хромато-масс-спектрометре «Agilent 5975С-7890А» (США) выполнялись сотрудниками ИЛ СО РАН А.А. Анискиной и Г.В. Пермяковой на базе КРЦКП ФИЦ КНЦ СО РАН (Кузьмин и др., 2020). Фенологические фазы оценивались в пункте испытания климатипов, глубина покоя исследовалась в СФУ (Пахарькова и др., 2014, 2019).

Исследование генеративных органов. Комплектование выборок по климатипам осуществлялось путем сбора в разные годы от 3 до 30 шишек с каждого дерева. При сборе, обработке и анализе материала использовались наиболее распространенные методические разработки С.А. Мамаева (1973), В.Л. Черепнина (1980), Н.А. Кузьминой (1978), А.И. Чернодубова (2009). Методом рентгенографии проводились исследования полнозернистости (Щербакова, 1965), в качестве альтернативного подхода отбраковка пустых светлых семян проводилась физическим методом. В анализе использованы материалы личного сбора и образцы, собранные ранее сотрудниками лаборатории и лесничества.

Оценка устойчивости климатипов сосны к грибным патогенам. Идентификация заболеваний в условиях питомника и позднее в культурах проводилась специалистами Центра защиты леса Красноярского края и одновременно фитопатологами ИЛ СО АН СССР Г.Н. Лебковой и И.С. Коссинской. В период эпифитотии, вызванной ценангиевым некрозом, оценка жизненного состояния деревьев проводилась по методике В.А. Алексева (1989), усовершенствованной применительно к географическим культурам сосны. При сплошном учете деревьев отмечались здоровые, слабо, средне, и сильно поврежденные деревья. На основании степени поражения хвои и доли поврежденных деревьев, были выделены группы климатипов, условно названные «устойчивые» и «неустойчивые». В условиях темно-серой лесной почвы проводился учет числа деревьев с повреждениями стволов смоляным раком.

Подходы к анализу данных, статистические методы. В географических культурах испытываются 83 климатипа, представляющие четыре подвида сосны обыкновенной по Л.Ф. Правдину (Правдин, 1964): обыкновенная (*P. sylvestris* L. subsp. *sylvestris* L.), лапландская (*P. sylvestris* subsp. *lapponica* Fries), сибирская (*P. sylvestris* L. subsp. *sibirica* Ledebour) и кулундинская (*P. sylvestris* L. subsp. *kulundensis* Sukaczew). Оценка успешности роста климатипов по каждому показателю рассчитывалась в процентном отношении к контролю и в долях стандартного отклонения от средних значений на участках. Этот методический прием используется многими исследователями (Giertych, 1979; Наквасина и др., 2008; Мерзленко и др., 2017). Вычисленное среднеарифметическое значение отклонений по комплексу показателей, названное «критерием успешности роста» (КУР), является итоговой оценкой роста и состояния климатипов.

Обработка всех полученных материалов проводилась общепринятыми методами (Рокицкий, 1973; Лакин, 1980; Буторова, 2000) с использованием программ «Microsoft Office Excel» и «Statistica 8.0». В работе использовались методы оценки нормальности распределения данных, параметрические и непараметрические критерии, корреляционно-регрессионный анализ, ранжированные ряды, функции аппроксимации при получении индексных кривых, однофакторный и многофакторный дисперсионный анализы, включающие апостериорную проверку критерием Тьюки и оценку компонентов дисперсии. Применялись кластерные анализы методом Уорда и методом k-средних.

При исследовании географических культур используется термин «климатип» (синонимы: происхождение, провениенция). Климатип представляет собой популяцию определенного географического происхождения, сформировавшуюся в определенных физико-климатических условиях (Изучение имеющихся ..., 1972).

ГЛАВА 3. Изменчивость таксационно-лесоводственных показателей сосны обыкновенной в географических культурах

Сохранность на песчаной почве. Варьирование сохранности у климатипов сосны отмечается от полной элиминации у бориспольского из Украины, до 93 % у печенгского из Мурманской обл. (Кузьмина, Кузьмин, 2017). Средняя сохранность на песчаной почве составляет 62 %, коэффициент изменчивости (CV) – 32 %. Сохранность контрольного варианта (богучанский климатип № 42) – 76 % (Рисунок 1). Густота древостоев у климатипов варьирует от 333 до 7408 шт./га.

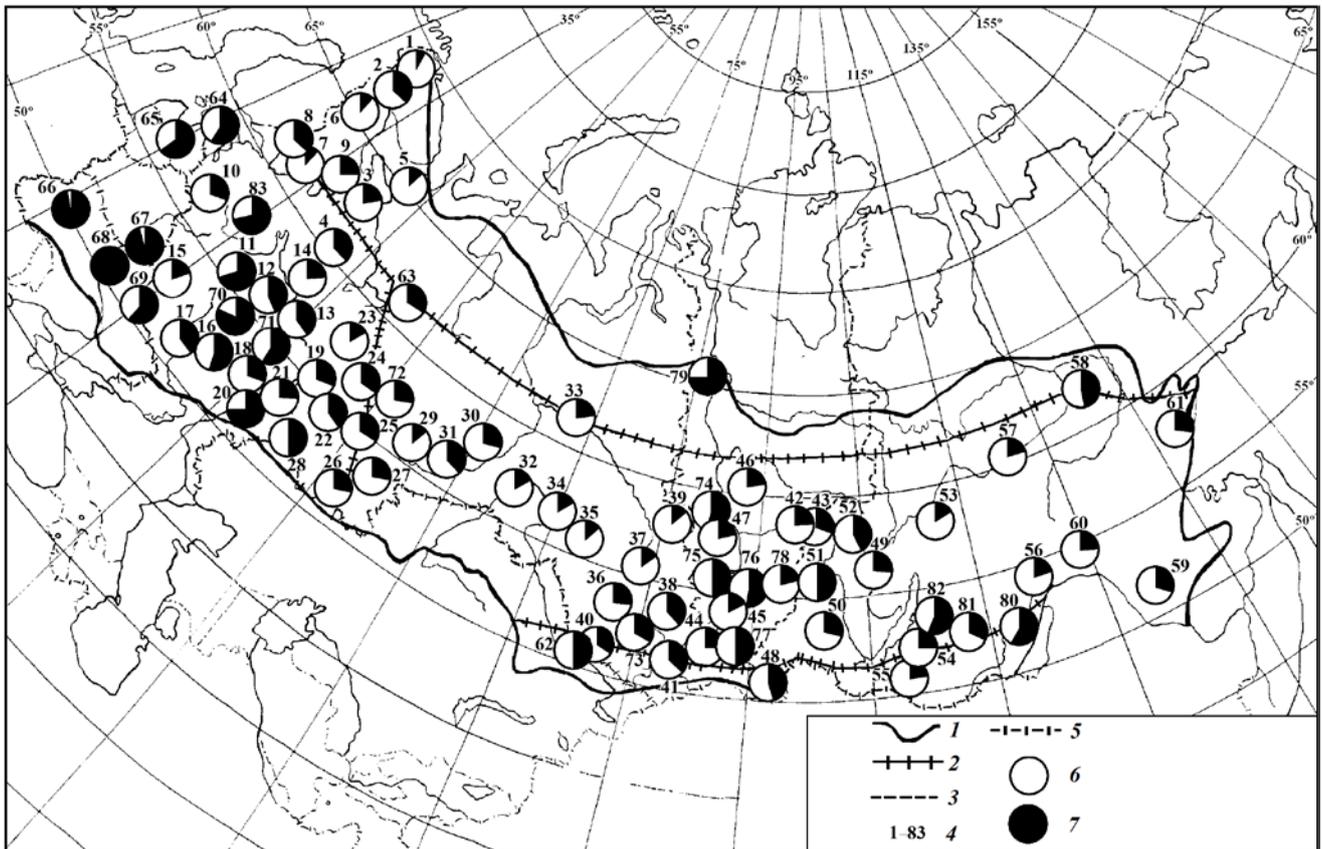


Рисунок 1. Сохранность климатипов сосны на песчаной почве (границы: 1 – ареала, 2 – подвидов (Правдин, 1964), 3 – Красноярского края; 4 – номер климатипов; 5 – границы республик бывшего СССР (1977 г.); 6 – доля живых деревьев, %; 7 – доля погибших деревьев, %)

При анализе динамики сохранности, 83 климатипа сосны сгруппированы по принадлежности к биоклиматическим секторам, выделенным И.А. Коротковым на основе континентальности климата (Коротков, 1994). В соответствии с географическим происхождением сосны выделено шесть групп климатипов, соответствующих семи континентальным секторам.

Значительная дифференциация по сохранности отмечается для представителей Восточно-Европейского слабо-континентального сектора, к которому отнесены шесть климатипов (№№ 1, 2, 6–9) с территории Кольско-Карельской лесорастительной области (ЛО) и восемь (№№ 64–69, 10, 83) из Днепровско-Прибалтийской ЛО. Климатипы сосны данного сектора дифференцируются на 4 группы (Рисунок 2). Первую группу представляют климатипы-лидеры по высокой сохранности и приживаемости. К ним относятся климатипы из северной и средней тайги Мурманской обл. и Карелии (№№ 1, 6, 7) с сохранностью 88–93 %. Итоговая сохранность второй группы меньше – 63–71 %, приживаемость высокая (89–98 %).

Группу составляют климатипы из северной тайги Мурманской обл. (№ 2), средней тайги Карелии (№№ 8, 9) и подтайги Псковской обл. (№ 10).

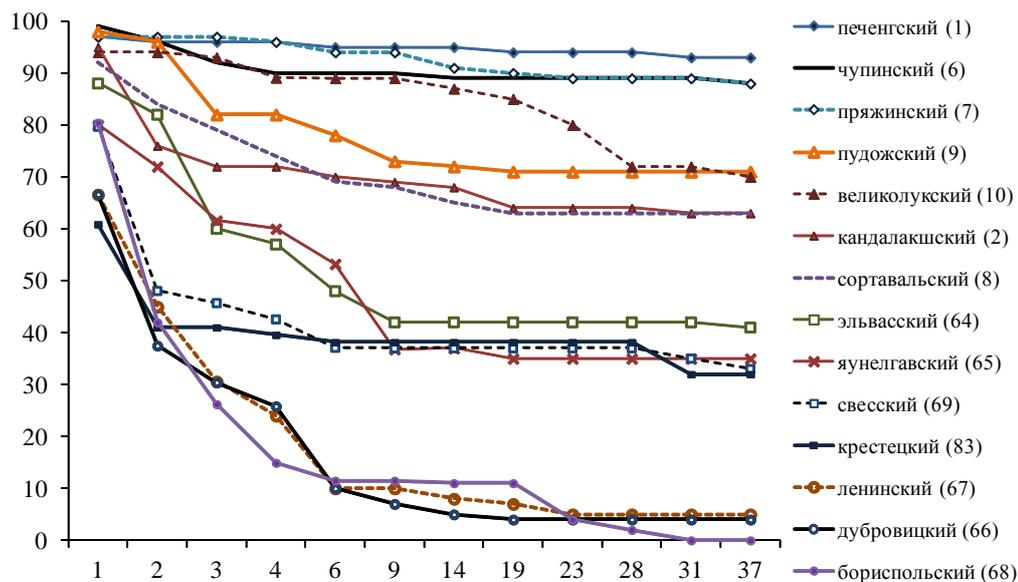


Рисунок 2. Динамика сохранности на песчаной почве у климатипов сосны (в скобках – авторский номер) с территории Восточно-Европейского слабо-континентального сектора (ось ординат – сохранность, %; ось абсцисс – возраст культур, лет)

Третью группу слабо-континентального сектора представляют климатипы из южной тайги Эстонии и Новгородской обл. (№№ 64, 83) и зоны широколиственно-хвойных лесов Украины и Латвии (№№ 65, 69) с сохранностью от 32 до 41 % (приживаемость 61–88 %). Элиминация прижившихся саженцев сосны у данных климатипов происходила продолжительнее, в течение девяти лет, особенно после повреждений хвои и почек в период заболевания, вызванного снежным шютте. Снижение сохранности произошло на 16 %. Климатипы четвертой группы сектора, имеющие низкую итоговую сохранность, представляют сосну из зоны сосново-широколиственных лесов Украины и Беларуси (№№ 66, 67) и лесостепи Украины (№ 68). В 6-летнем возрасте в связи с заболеванием снежным шютте у них отмечается снижение сохранности до 10–24 %. В 23-летнем возрасте, после эпифитотии ценангиевого некроза, сохранность снизилась до 4–5 %. Полная элиминация деревьев произошла у климатипа (№ 68) из Украины в 30 лет.

К Восточно-Европейскому умеренно-континентальному сектору относятся 26 климатипов с территории Восточно-Европейской и Уральской ЛО. По сохранности они дифференцируются на три группы: с высокими значениями сохранности (85–87 %) и приживаемости (96–99 %); относительно меньшей сохранностью (45–77 %) и высокой приживаемостью; низкой сохранностью (21–29 %) и хорошей приживаемостью (80–99 %). Низкую сохранность имеют в основном климатипы из центральных областей России.

Территорию Западно-Сибирского континентального сектора представляют 21 климатип и приобщенный к ним долонский (№ 62), представитель Внутриматерикового сильно континентального субаридного и аридного сектора из Казахстанской равнинно-плоскогорной ЛО. Итоговая сохранность географической группы из 22 климатипов варьирует от 25 до 86 % при приживаемости 86–99 % у большей части климатипов. Климатипы данного сектора дифференцируются на отдельные климатипы, например, туруханский (№ 79) с низкой сохранностью (25

%), и группы с лучшей сохранностью (58 % и выше). К Средне-Сибирскому сильно континентальному сектору относятся 10 климатипов с итоговой сохранностью 50–78 %. Дифференцируются климатипы на две группы: с сохранностью 69–78 % и приживаемостью 88–98 % (№№ 42, 43, 46, 49, 50, 78) и с меньшей сохранностью 50–57 % (№№ 51, 52, 58, 75). Снижение сохранности отмечается в первые 2–3 года после посадки и в периоды заболеваний снежным шютте и ценангиевым некрозом.

Восточно-Сибирский крайне-континентальный сектор представляют семь климатипов из разных лесорастительных зон (таежных, подтаежных, подтаежно-степных, горно-таежных) Иркутской и Амурской обл., Бурятии и Забайкальского края. Дальневосточный континентально-муссонный сектор представляют свободненский и аянский климатипы (№№ 59 и 61) из Амурской обл. и Хабаровского края. Объединенная группа климатипов из двух самых восточных секторов имеет высокие показатели приживаемости (93–99 %). По сохранности среди них выделяются баргузинский (№ 82) и нерчинский (№ 80) климатипы, представляющие по своему происхождению котловины Бурятии и Забайкалья, имеющие относительно низкую итоговую сохранность (41–43 %). Сохранность остальных варьирует от 68 до 84 %.

Сохранность на суглинистой почве. Средняя сохранность составляет 26 %, что в 2.4 раза меньше, чем на песчаной почве, CV – 57 % (Рисунок 3).

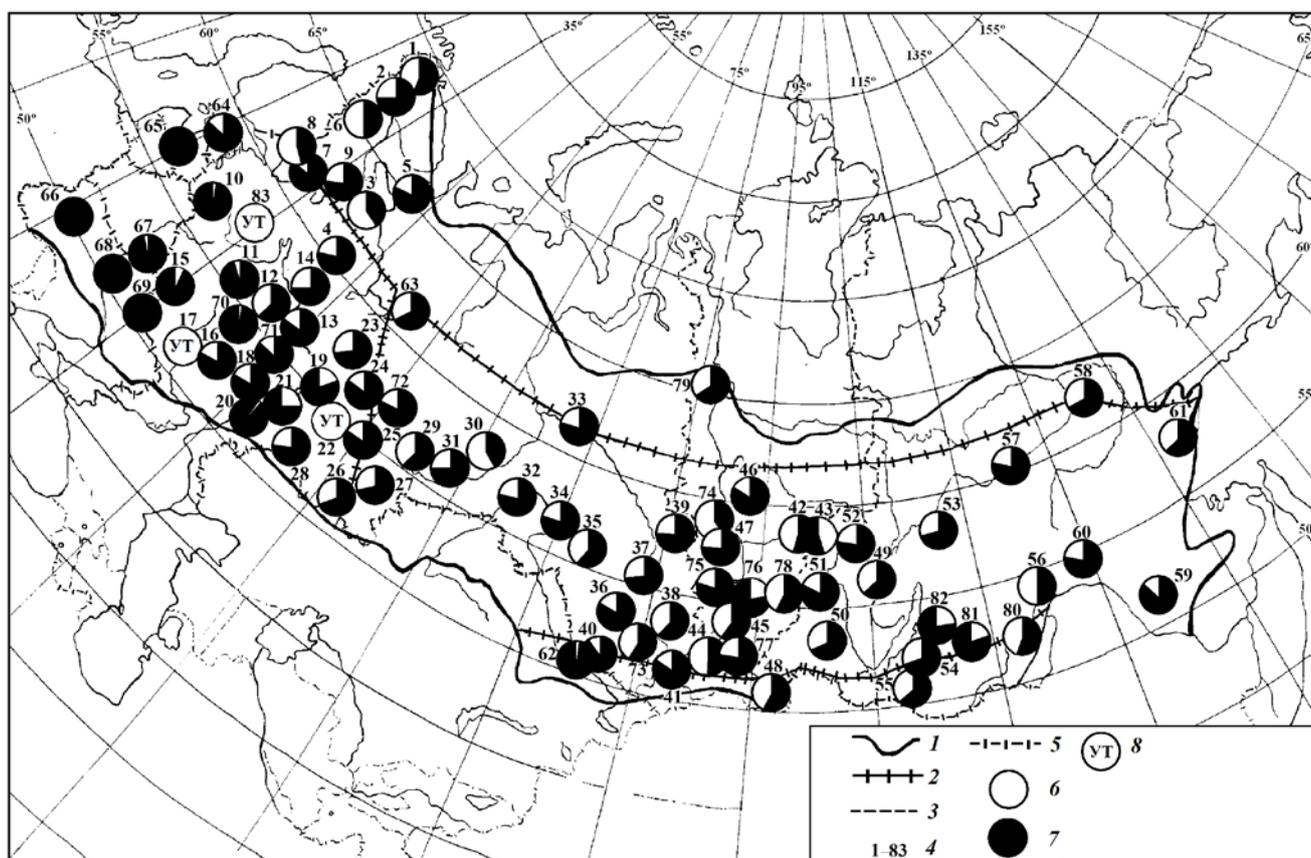


Рисунок 3. Сохранность климатипов сосны на суглинистой почве (1–7 – см. Рисунок 1; 8 – утраченные климатипы из-за антропогенного фактора)

Пределы варьирования итоговой сохранности отмечаются от полной элиминации деревьев у климатипов из Украины, Латвии и Беларуси, до 60 % у могочинского (№ 56) из Забайкальского края. Сохранность контрольного варианта – 46 % (Кузьмин, Кузьмина, 2020а). Густота варьирует от 200 до 4964 шт./га.

На адаптацию потомств климатипов к условиям суглинистой почвы оказали влияние генетические особенности сосны, обусловленные местом происхождения, успешность конкуренции саженцев с травостоем и трудно учитываемые факторы в период посадки и уходов в пункте испытания. Элиминация саженцев у одних климатипов отмечается в первые три года после посадки, у других – продолжается до 5–7 лет. Значительная дифференциация климатипов по итоговой сохранности отмечается среди представителей Восточно-Европейского слабо-континентального сектора (Рисунок 4).

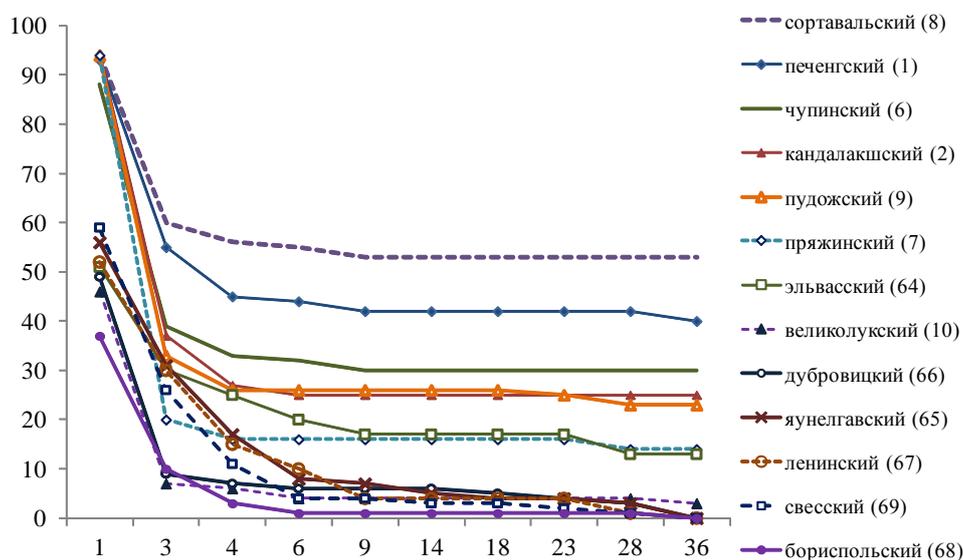


Рисунок 4. Динамика сохранности на суглинистой почве у климатипов сосны с территории Восточно-Европейского слабо-континентального сектора (подписи осей – см. Рисунок 2)

Относительно высокая сохранность 40–53 % отмечается у двух климатипов из Мурманской обл. и Карелии (№№ 1, 8). Низкая сохранность (13–30 %) в пределах участка выявлена у климатипов из подзон северной и средней тайги Мурманской обл. и Карелии, а также из подзоны южной тайги Эстонии (№№ 2, 6, 7, 9, 64). Полную элиминацию саженцев имеют пять климатипов с Украины (№№ 66, 68, 69), Республики Беларусь (№ 67) и Латвии (№ 65).

Сохранность саженцев у климатипов сосны из Восточно-Европейского умеренно-континентального сектора варьирует от 2 % из Саратовской обл. (№ 20) до 59 % из средней тайги Архангельской обл. (№ 3). Приживаемость варьирует в пределах 42–98 %. Климатипы из Западно-Сибирского континентального сектора сохранились в пределах 3–60 %. Сохранность до 9 % отмечается у двух климатипов из сухих ленточных боров, окруженных степями – у ракистовского (№ 40) с юга Алтайского края и у долонского (№ 62) из степной зоны Казахстана. Сохранность остальных варьирует от 17 до 60 %. Приживаемость сосны этого сектора высокая (61–97 %), кроме долонского (32 %).

Сохранность 10 климатипов Средне-Сибирского сильно континентального сектора варьирует от 18 до 46 %, при приживаемости 65–97 %. Выделяются две группы. Высокие показатели сохранности (42–46 %) с приживаемостью 65–88 % отмечаются у контрольного и проспихинского (№ 43) происхождений из южной тайги и канского (№ 78) из лесостепи Красноярского края. Группа с пониженной сохранностью представлена климатипами (№№ 46, 51, 52, 75) из Красноярского края и Иркутской обл. Климатипы, представляющие Восточно-Сибирский крайне-

континентальный и Дальневосточный континентально-муссонный сектора, имеют сохранность 21–50 %, приживаемость 81–99 %. В этой группе климатипов выделяются могочинский климатип (№ 56) и нерчинский (№ 80) из подтаежно-сосновых лесов Даурской лесорастительной области Забайкальского края, имеющие высокие показатели приживаемости (97 и 95 %) и сохранности (50 и 44 %).

На сохранность сосны в ГК влияют как генетические особенности климатипов, сформированные под действием лесорастительных условий их мест происхождения, так и условия в пункте испытания. Соответствие лесорастительных условий места происхождения и пункта испытания оказывает существенное влияние на адаптацию и успешность выживания сосны в ГК. Наибольшее влияние на дисперсию итоговой сохранности в ГК оказывают почвенные условия произрастания культур (59 %), по сравнению с фактором теплообеспеченности мест происхождения климатипов (14 %). Наиболее устойчивыми в условиях песчаной почвы являются потомства сосны, места происхождения которых характеризуются: меньшей суммой температур > 10 °С, что подтверждается коэффициентом корреляции Спирмена ($r = -0.45$; $p < 0.001$; $n = 83$), в условиях суглинистой почвы – коротким периодом с температурами > 10 °С ($r = -0.53$; $p < 0.001$; $n = 80$). В пункте испытания выявлены значимые отрицательные коэффициенты корреляции массы семян материнских насаждений климатипов с сохранностью в условиях песчаной ($r = -0.47$; $p < 0.001$; $n = 62$) и суглинистой ($r = -0.34$; $p < 0.01$; $n = 59$) почв.

Динамика роста в высоту и показатели стволовой продуктивности на песчаной почве. Средняя высота деревьев у климатипов варьирует от 3.5 ± 0.25 до 9.7 ± 0.30 м. Высота у контроля составляет 6.3 ± 0.20 м и близка к средней высоте экспериментального участка – 6.1 ± 0.16 м. Индивидуальная изменчивость варьирует от 7 до 43 %. Географическая изменчивость – повышенная (23 %).

По средней высоте климатипы разделены на три группы. Первую группу представляют климатипы с высотой, превышающей среднее значение на 0.5 – 2.5σ , и на 8–54 % высоту контрольного. Средняя высота для группы 7.7 ± 0.14 м (122 % относительно контроля). К ним относятся потомства сосны из среднепродуктивных насаждений Сибири, в основном из южной тайги Красноярского края, Иркутской обл., а также средней и южной тайги европейской части России (Рисунок 5 (А)). Различия с контролем отмечаются для большинства представителей лидирующей группы ($p < 0.001$). Высокое ранговое положение по высоте стабильно сохраняется у климатипов из Вологодской обл. и Карелии (№№ 4, 9), Красноярского края (№№ 43, 46, 47, 74), Иркутской обл. (№№ 52 и 53) и Забайкальского края (№ 80). Высокие значения средней высоты также отмечаются у климатипов Кемеровской, Курганской, Омской обл. и Башкортостана (№№ 38, 31, 34, и 26 соответственно).

Вторую группу, в которую входит и контроль, представляют 23 климатипа, происхождением из европейской части России и Сибири. Абсолютные средние высоты в этой группе варьируют от 5.4 до 6.7 м. (Рисунок 5(Б)). Средняя высота для группы составляет 5.9 ± 0.08 м (94 % к контролю). Климатипы данной группы в динамике имеют нестабильные по величине приросты. Некоторые из них в первые 14 лет роста имели небольшие годовые приросты, уступающие контролю, в последующие годы прирост у них увеличился, и средняя высота отдельных климатипов превышает значение контроля. В 37-летнем возрасте только 16 климатипов из первой группы подтвердили статус кандидатов в сорта-популяции из 21, отобранного в возрасте 20 лет.

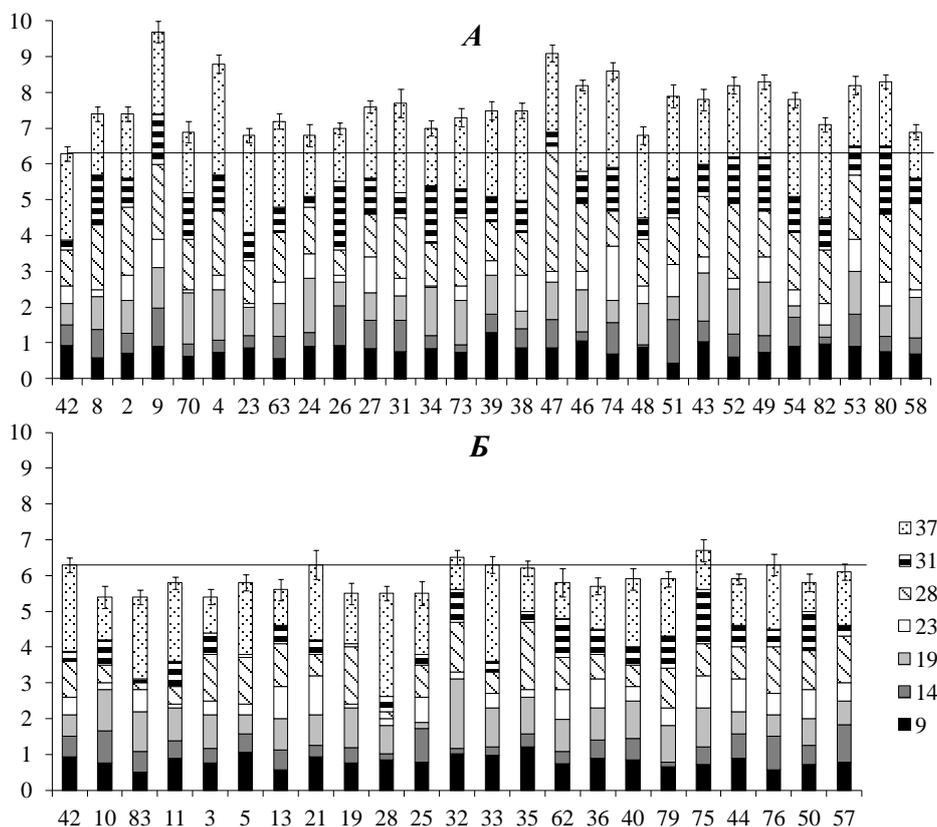


Рисунок 5. Динамика роста в высоту (ось ординат, м) у климатипов сосны первой (А) и второй (Б) групп на песчаной почве (ось абсцисс – № климатипов; первый слева – контроль (линия), далее – по возрастанию географической долготы места происхождения; легенда – возраст культур, лет)

Третью группу составляют 38 % тестируемых климатипов, имеющих относительно низкие средние высоты, меньше 5.4 м. Группа состоит из климатипов сосны с территорий европейской части России, Урала, юга Сибири и Забайкалья. Средняя высота в группе составляет 4.8 ± 0.11 м или 76 % от высоты контроля и на 0.7σ меньше средней высоты на участке. Согласно динамике рангового положения, около 40 % климатипов имеют стабильно низкий рост, остальные демонстрируют нестабильные приросты (Рисунок 6).

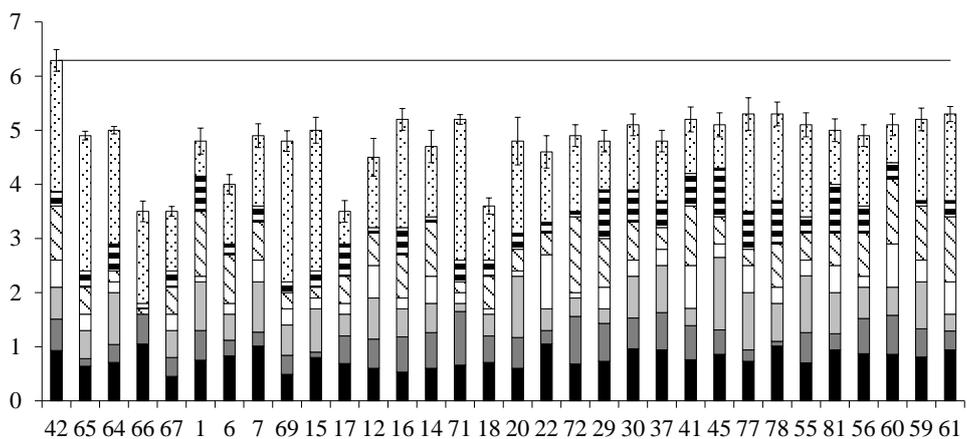


Рисунок 6. Динамика роста в высоту у климатипов сосны третьей группы на песчаной почве (подписи осей и условные обозначения – см. Рисунок 5)

На основе итоговых значений средней высоты и комплекса других показателей скорректирована группа перспективных климатипов – кандидатов в сорта-популяции. Группа представлена происхождениями из Карелии, Коми, Мурманской, Вологодской, Кировской, Кемеровской, Томской, Иркутской обл. и

Красноярского края. Названия и номера климатипов указаны в Таблице. Средняя высота перспективных климатипов сосны по отношению к контролю составляет 129 %, относительно среднего на участке превышение составляет более 1σ (Рисунок 7).

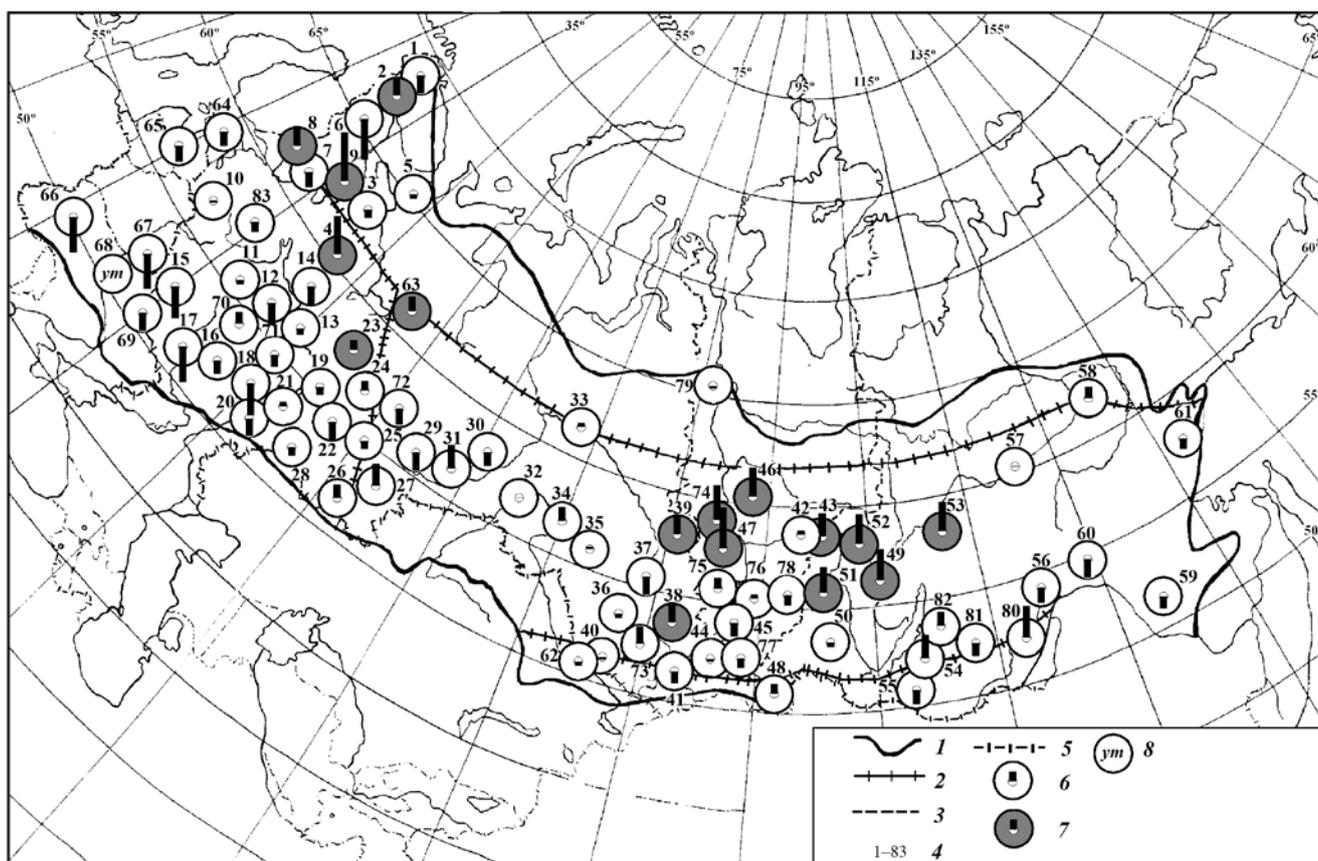


Рисунок 7. Средняя высота дерева у климатипов сосны в долях стандартного отклонения (σ) на песчаной почве (1–5 – см. Рисунок 1; 6 – превышение (направление линии вверх) или отставание (направление линии вниз) от среднего значения (радиус внешней окружности равен 1σ); 7 – перспективные климатипы; 8 – утраченный климатип)

Анализ зависимости средней высоты в условиях песчаной почвы от климатических факторов места происхождения климатипов выявил значимые отрицательные коэффициенты корреляции Спирмена ($n = 82$) с длиной периода с температурами $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.40$; $p < 0.001$), с суммой температур $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($r = -0.38$; $p < 0.001$), длиной безморозного периода ($r = -0.39$; $p < 0.001$), с осадками мая–июня ($r = -0.28$; $p < 0.05$), а также с массой исходных семян ($r = -0.32$; $p < 0.01$; $n = 72$). Положительные связи отмечаются с географической долготой ($r = 0.37$; $p < 0.001$; $n = 82$) и широтой ($r = 0.26$; $p < 0.05$; $n = 82$).

Средний диаметр деревьев исследуемых климатипов варьирует от 2.7 ± 0.24 до 8.4 ± 0.32 см, у контрольного варианта составляет 5.6 ± 0.22 см. Индивидуальная изменчивость варьирует от среднего до очень высокого уровня ($CV = 14\text{--}65\%$). Географическая изменчивость является повышенной ($CV = 22\%$). Коэффициент корреляции между средней высотой и диаметром равен 0.94 ($p < 0.001$). Значимых корреляционных связей диаметра с сохранным и густотой не отмечается.

Форма ствола. Доля прямоствольных деревьев у климатипов варьирует от 0 до 100 %. Доля кривоствольных деревьев $> 40\%$ выявлена у юго-западных происхождений относительно места испытания: долонского с юга Северного Казахстана, чемальского с Алтая и ермаковского с юга Красноярского края. Относительная доля прямоствольных деревьев на уровне 100 % отмечается у

климатипов сосны Европейского Севера и читинского климатипа из Забайкалья. Высокая доля прямоствольных деревьев (82–83 %) отмечается у климатипов из восточных регионов – свободненского из Амурской обл. и аянского из Хабаровского края. Выявлена значимая отрицательная регрессионная линейная модель зависимости доли прямоствольных деревьев от суммы температур $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пунктах происхождения климатипов ($r = -0.77$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.60$). Значимая корреляция отмечается с плотностью древостоев ($r = 0.46$; $p < 0.001$).

Объем ствола и запас стволовой древесины. Объем ствола варьирует от 1.2 дм^3 до 28.3 дм^3 , среднее значение – 8.7 дм^3 , у контроля средний объем ствола – 8.5 дм^3 . Запас стволовой древесины у климатипов варьирует от 1 до 162 $\text{м}^3/\text{га}$, среднее значение – 45 $\text{м}^3/\text{га}$, у контроля – 57 $\text{м}^3/\text{га}$. В долях стандартного отклонения от среднего значения запас у климатипов варьирует от -1.4σ до $+3.7\sigma$, контроль имеет $+0.4\sigma$ (Рисунок 8). Отмечаются значимые коэффициенты корреляции Спирмена между запасом стволовой древесины и плотностью древостоев ($r = 0.32$; $p < 0.01$; $n = 82$), северной широтой ($r = 0.34$; $p < 0.01$) и восточной долготой ($r = 0.44$; $p < 0.001$) мест происхождения климатипов.

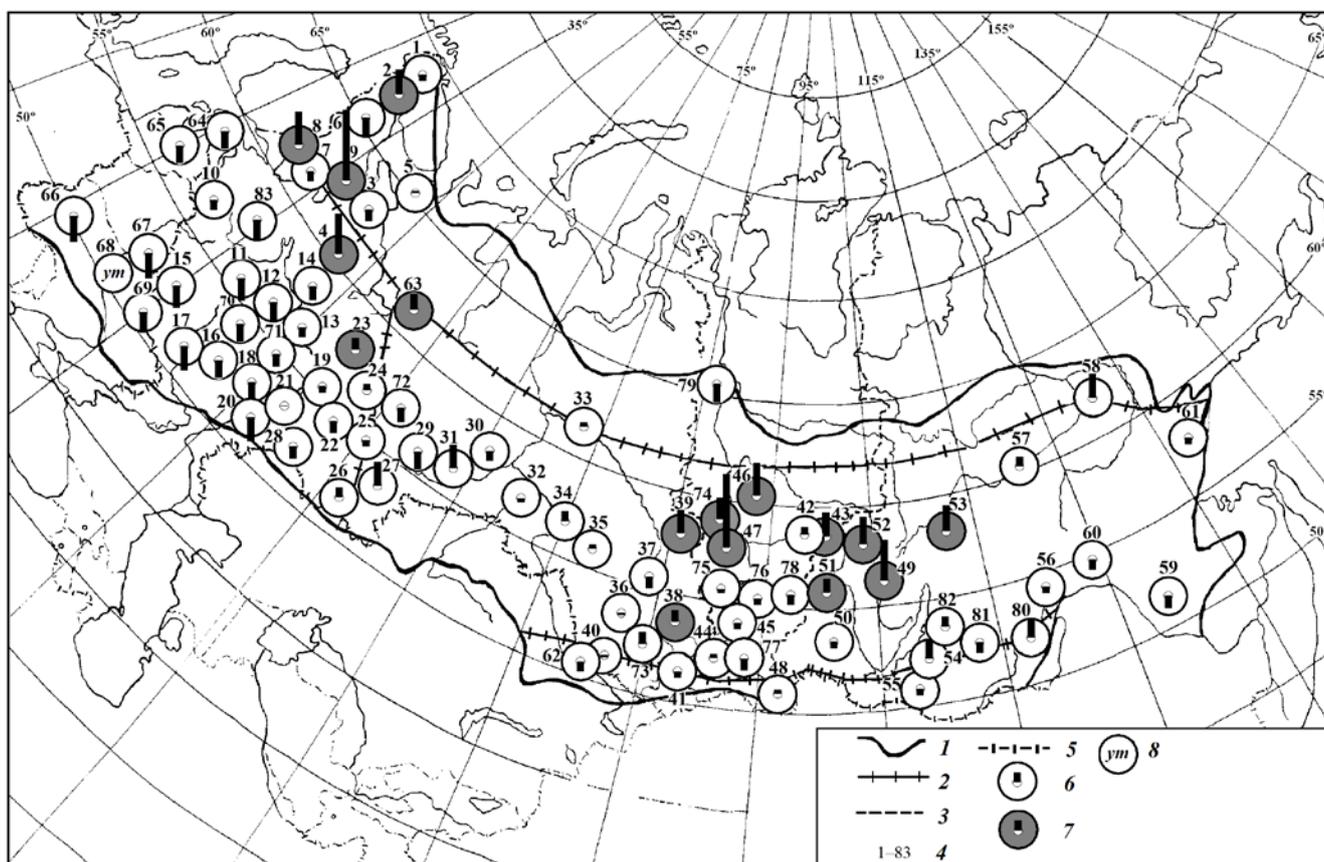


Рисунок 8. Запас древесины у климатипов сосны в долях стандартного отклонения (σ) на участке с песчаной почвой (1–8 – см. Рисунки 1 и 7)

Данные по запасу стволовой древесины в условиях песчаной почвы в основном подтверждают перспективность отбора по высоте 16 лучших климатипов, показанных ранее на Рисунке 7. В абсолютных значениях запас стволовой древесины у 16 перспективных климатипов варьирует от 63 $\text{м}^3/\text{га}$ до 162 $\text{м}^3/\text{га}$. Преимущество относительно контроля в среднем составляет 60 % (11–176 %).

Динамика роста в высоту и показатели стволовой продуктивности в условиях суглинистой почвы. Средняя высота сосны разного происхождения в условиях суглинистой почвы в 2.5 раза превышает среднюю высоту у тех же

происхождений в условиях песчаной. Средняя высота климатипов в условиях суглинистой почвы варьирует от 11.9 ± 0.19 до 18.2 ± 0.20 м, высота контроля (15.8 ± 0.33 м) близка к средней высоте культур на участке – 15.4 ± 0.15 м. Индивидуальная изменчивость варьирует от низкого до среднего уровня (4–16 %). Географическая изменчивость имеет низкий уровень (8 %). Около 30 % климатипов, имеют превышение по высоте в пределах от 0.5σ до 2.1σ к среднему значению. Их представляет сосна с территорий Сибири, Забайкалья, севера европейской части России, центрально-восточного и юго-восточного регионов европейской части России. Высоты на уровне контроля ($+0.3\sigma$, $+0.4\sigma$) отмечаются у 19 % климатипов. Наибольший процент климатипов (52 %) отстает в росте от контроля и их значение к среднему варьирует от -2.7σ до $+0.2\sigma$ (Рисунок 9). В условиях суглинистой почвы у климатипов отмечается отрицательный коэффициент корреляции между средней высотой и северной широтой их мест происхождения ($r = -0.28$; $p < 0.05$; $n = 73$).

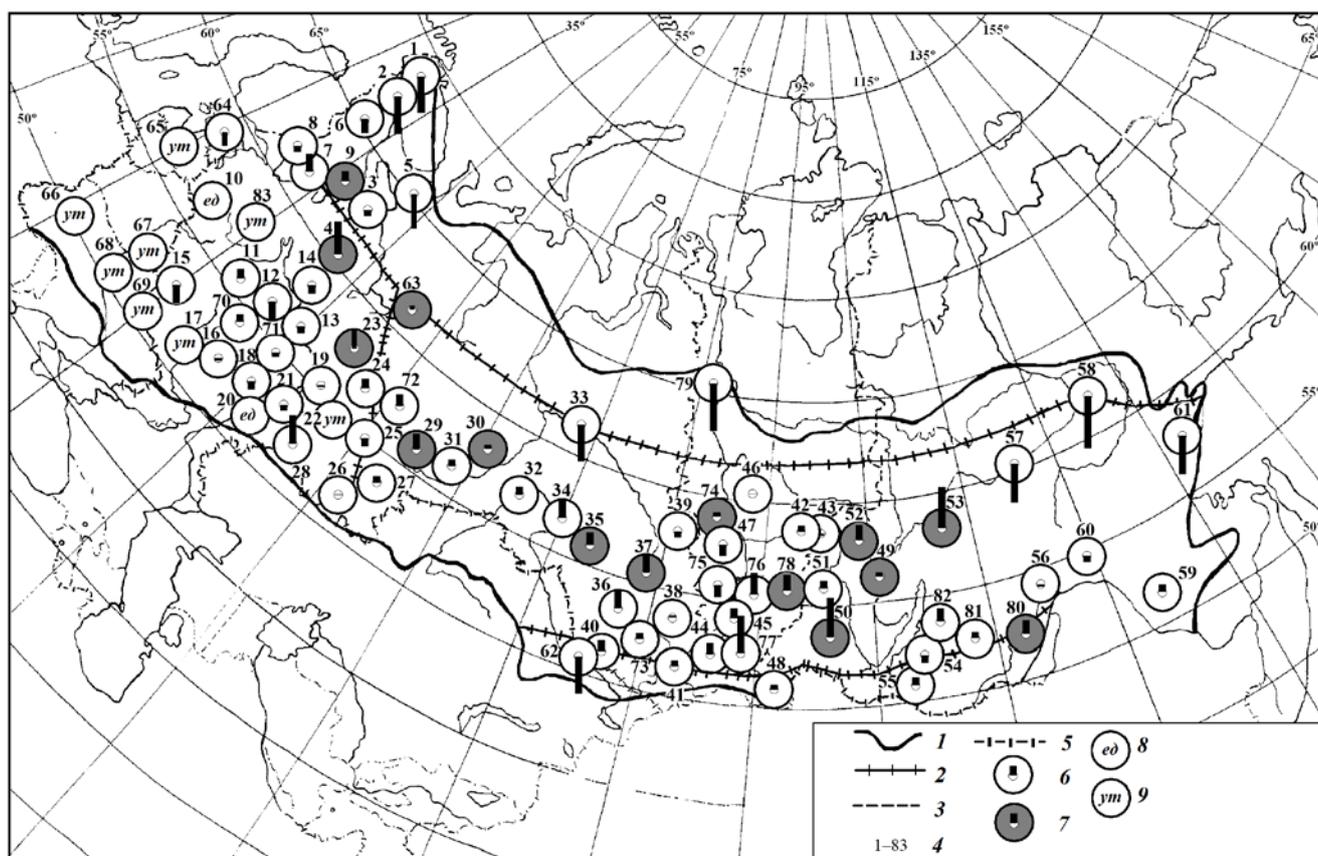


Рисунок 9. Средняя высота у климатипов сосны в долях σ на суглинистой почве (1–7 – см. Рисунки 1 и 7; 8 – климатипы с единично сохранившимися деревьями; 9 – утраченные климатипы)

В результате анализа динамики средних высот выявлено 19 инорайонных климатипов с высотами, превышающими среднюю высоту на 0.5 – 2.1σ , и представляющих первую группу. К ним относятся климатипы из южной тайги Красноярского края и Иркутской обл., Урала и Забайкалья, а также из средней и южной тайги европейской части России и юго-восточных районов Восточно-Европейской равнины (Рисунок 10 (А)). Средние высоты варьируют от 16.2 м до 18.2 м, среднее значение для группы составляет 16.8 ± 0.14 м или 106 % от контроля и превышает среднюю высоту на участке на 1σ . В последние 17 лет роста климатипы первой группы в большинстве случаев стабильно имеют преимущество относительно контроля или соответствуют его уровню. Различия с контролем отмечаются для многих представителей группы при высоком уровне значимости (p

< 0.001 ; $n = 73$). В группе выделено 10 перспективных климатипов кандидатов в сорта-популяции: №№ 4, 23, 29, 35, 37, 78, 50, 52, 53, 80, с преимуществом по высоте от 4 % до 15 % к контролю (Рисунок 10 (А)).

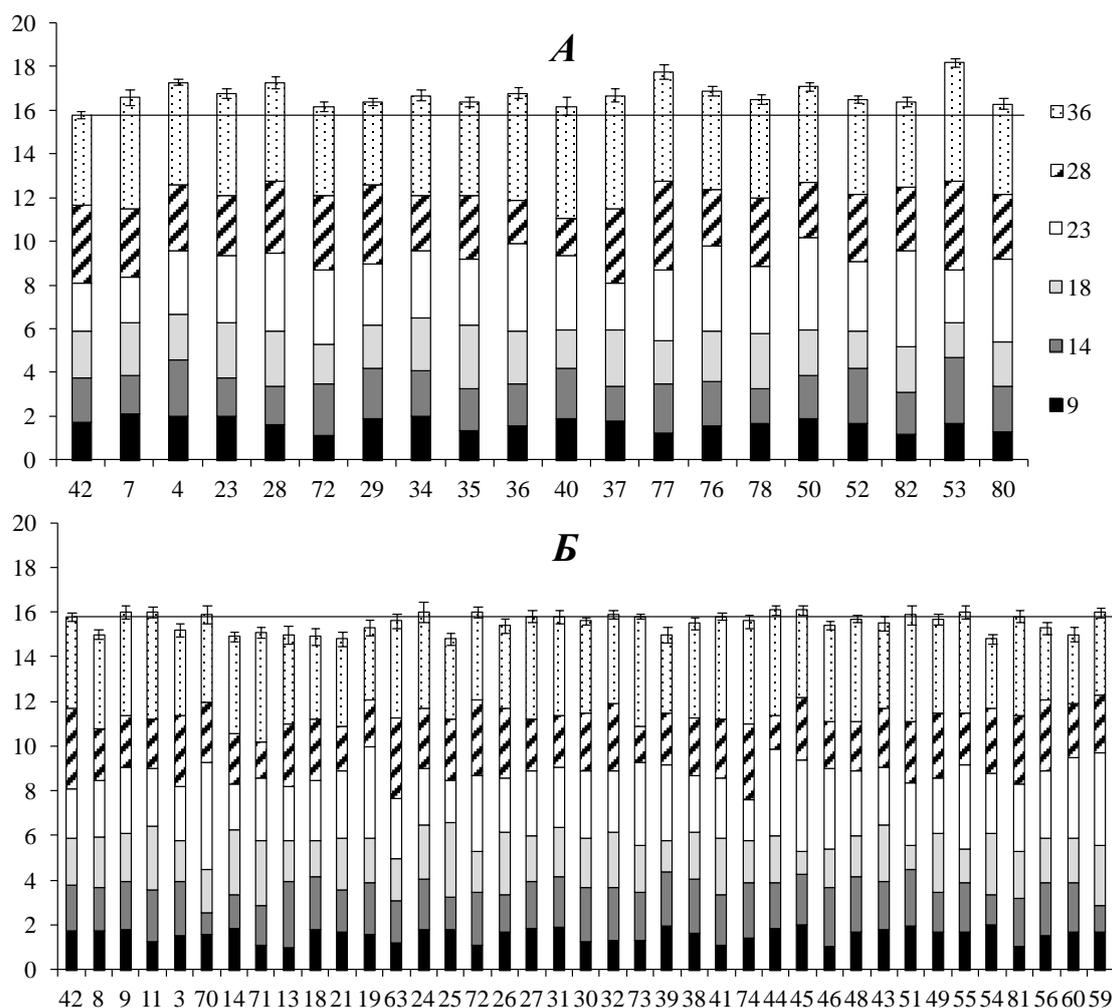


Рисунок 10. Динамика роста в высоту у климатипов сосны первой (А) и второй (Б) групп на суглинистой почве (подписи осей – см. Рисунок 5; легенда – возраст культур, лет)

Вторую группу представляют 53 % от всех климатипов, включая контроль (Рисунок 10 (Б)). Средние высоты климатипов этой группы ($h = \bar{x} \pm 0.5\sigma$) варьируют от 14.8 м до 16.1 м. Средняя высота для группы составляет 15.5 м или 98 % относительно контроля и близка к среднему значению на участке. Большинство климатипов средней группы на разных возрастных этапах имеют нестабильный рост в высоту. Из второй группы в перспективные выбраны пять климатипов (№№ 9, 63, 30, 74, 49), с показателями на уровне контроля.

Третья группа ($h < \bar{x} - 0.5\sigma$) – самая малочисленная, ее представляют 15 климатипов (21 %), стабильно отстающих по высоте от контроля. Средние высоты у климатипов этой группы варьируют в пределах 11.9–15.8 м, средняя высота для группы составляет 13.5 м или 85 % от контроля. Между всеми тремя выделенными группами отмечаются значимые различия по высоте ($p < 0.001$), с возрастом различия между климатипами первой и третьей группами увеличиваются.

Анализ итоговых результатов по высоте показал, что на суглинистой почве перспективными по росту в высоту и с учетом других селекционных показателей являются 15 климатипов, отобранных из двух первых групп с относительно высокими и средними показателями (Таблица).

Таблица. Средние значения основных показателей перспективных климатипов сосны – кандидатов в сорта-популяции*

Климатип		Показатели						
№	Название (лесничество, область, край или республика), единый инвентарный номер)	С	В	Д	П	О	З	Ц
		%	$\bar{X} \pm m$, м	$\bar{X} \pm m$, см	%	дм ³	м ³ /га	%
В условиях песчаной почвы								
2	Кандалакшский, Мурманская, 2	63	7.4±0.21	6.9±0.22	100	14.9	86	59
4	Тотемский, Вологодская, 9	62	8.8±0.25	7.5±0.36	92	20.7	104	36
8	Сортавальский, Карелия, 16	63	7.4±0.21	6.7±0.23	92	14.1	82	48
9	Пудожский, Карелия, 17	71	9.7±0.30	8.4±0.32	100	28.3	157	84
23	Слободской, Кировская, 68	85	6.8±0.20	5.5±0.30	88	8.8	63	83
38	Гурьевский, Кемеровская, 89	62	7.5±0.21	6.4±0.30	84	13.0	66	28
39	Колпашевский, Томская, 88	85	7.5±0.26	6.5±0.22	94	11.4	78	74
42	Богучанский Красноярский, 94	76	6.3±0.20	5.6±0.22	87	8.5	57	72
43	Проспихинский, Краснояр., 101	69	7.8±0.30	6.8±0.32	93	15.2	87	86
46	С.-Енисейский, Краснояр., 102	78	8.2±0.14	6.3±0.25	91	13.7	95	99
47	Енисейский, Краснояр., 103	79	9.1±0.24	7.9±0.30	100	23.6	162	93
49	Усть-Кутский, Иркутская, 106	73	8.3±0.20	7.1±0.30	86	17.6	110	90
51	Вихоревский, Иркутская, 108	50	7.9±0.33	7.0±0.33	75	16.3	66	82
52	Катангский, Иркутская, 109	56	8.2±0.23	7.4±0.30	96	18.9	85	64
53	Мамский, Иркутская, 110	84	8.2±0.25	6.4±0.40	94	14.1	84	81
63	Корткеросский, Коми, 10	65	7.2±0.21	6.2±0.28	100	11.8	69	54
74	Н.-Енисейский, Краснояр., 93	47	8.6±0.24	7.7±0.32	94	21.3	78	81
В условиях суглинистой почвы								
4	Тотемский, Вологодская, 9	21	17.3±0.15	17.0±0.56	88	196	343	-
9	Пудожский, Карелия, 17	23	16.0±0.29	16.5±0.58	92	172	346	
23	Слободской, Кировская, 68	26	16.8±0.22	15.6±0.53	95	161	353	
29	Ревдинский, Свердловская, 76	37	16.4±0.18	14.7±0.41	80	140	450	
30	Тавдинский, Свердловская, 77	60	15.6±0.18	12.2±0.35	88	92	457	
35	Кыштовский, Новосибирская, 85	38	16.4±0.24	14.5±0.57	90	136	347	
37	Болотнинский, Новосибирская, 87	26	16.7±0.30	15.9±0.58	88	166	351	
42	Богучанский Красноярский, 94	46	15.8±0.18	13.6±0.36	91	116	354	
49	Усть-Кутский, Иркутская, 106	37	15.7±0.23	15.0±0.52	89	140	388	
50	Зиминский, Иркутская, 107	36	17.1±0.20	18.1±1.02	88	220	502	
52	Катангский, Иркутская, 109	23	16.5±0.17	16.6±0.44	90	179	331	
53	Мамский, Иркутская, 110	29	18.2±0.20	15.9±0.51	88	180	412	
63	Корткеросский, Коми, 10	32	15.6±0.32	14.6±0.55	98	132	369	
74	Н.-Енисейский, Краснояр., 93	58	15.6±0.30	13.0±0.37	93	104	395	
78	Канский, Краснояр., 97	42	16.5±0.21	13.9±0.39	90	126	425	
80	Нерчинский, Забайкальский, 114	44	16.3±0.25	14.3±0.56	80	131	459	

*Примечание: № – авторский номер климатипа; С – сохранность; В – высота; Д – диаметр; П – доля прямоствольных деревьев; О – объем ствола; З – запас стволовой древесины; Ц – доля устойчивых деревьев к ценангиевому некрозу

Девять перспективных климатипов из Сибири: из Новосибирской обл., Красноярского края, Иркутской обл. и Забайкальского края (№№ 35, 37, 74, 78, 49, 50, 52, 53, 80), четыре с европейской части России: Вологодской обл., Карелии, Кировской обл. и Республики Коми (№№ 4, 9, 23 и 63) и два из таежных лесов Свердловской области (№№ 29, 30). Преимущество по средней высоте у некоторых из них достигает 15 % относительно контроля. Превышение над средней высотой участка варьирует от 0.1σ до 2.0σ.

Средний диаметр у климатипов в условиях суглинистой почвы варьирует от 10.0 ± 0.52 до 22.0 ± 0.85 см, у контрольного варианта составляет 13.6 ± 0.49 см, что ниже среднего диаметра (15.6 ± 0.29 м) на экспериментальном участке. Средний диаметр на участке с суглинистой почвой в 2.9 раза превышает диаметр на песчаной почве. Коэффициент индивидуальной изменчивости диаметра, по шкале С.А. Мамаева (1973), варьирует от среднего (14 %) до высокого уровня (37 %). Географическая изменчивость диаметра равна 16 %, что значительно больше, чем изменчивость роста в высоту. Отмечается значимая отрицательная корреляция с густотой ($r = -0.71$; $p < 0.001$; $n = 73$). Проведенный дисперсионный анализ показал, что группа климатипов из теплых мест происхождения, несмотря на большую густоту, имеет достоверно ($p < 0.001$) больший диаметр по сравнению с климатипами из более холодного климата.

Форма ствола. Доля прямоствольных деревьев у климатипов в условиях суглинистой почвы варьирует от 0 до 100 %, среднее – 83 %. Доля прямоствольных деревьев у контроля – 91 %. Значение этого показателя выше контроля отмечается только у 1/3 сохранившихся климатипов. Значимая связь, при которой регрессионная линейная модель точнее описывает зависимость доли прямоствольных деревьев с характеристиками места происхождения, отмечается с суммой температур > 10 °С ($r = -0.63$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.40$).

Объем ствола и запас стволовой древесины. Варьирование среднего объема ствола у климатипов сосны на этом экспериментальном участке составляет 52–284 дм³, среднее значение – 153 дм³, у контроля средний объем составляет 116 дм³. Запас стволовой древесины у климатипов на участке варьирует от 39 м³/га до 549 м³/га, среднее значение – 295 м³/га, у контрольного варианта – 354 м³/га. По отношению к среднему запасу преимущество выявлено у 36 климатипов, значения которых варьируют от $+0.1\sigma$ до $+2.3\sigma$ (Рисунок 11).

Отмечаются значимые ($p < 0.001$) отрицательные коэффициенты корреляции (Спирмена) объема ствола ($r = -0.64$) и диаметра (-0.71) с густотой, между запасом и густотой связь положительная (0.72). Отмечается значимая отрицательная корреляционная связь между объемом ствола и северной широтой ($r = -0.27$; $p < 0.05$; $n = 73$). Выявлена положительная связь между запасом стволовой древесины и восточной долготой ($r = 0.29$; $p < 0.05$; $n = 73$), для выборки из южных климатипов (южнее 56° с.ш.) коэффициент корреляции выше ($r = 0.56$; $p < 0.001$; $n = 35$).

Отрицательное отклонение от среднего запаса – отмечается у 34 климатипов в пределах от -2.3σ до -0.1σ . Запас стволовой древесины в абсолютных значениях у отобранных из первых двух групп лучших 15 климатипов варьирует от 317 до 502 м³/га, при этом запас контроля составляет 354 м³/га. Среди 15 отобранных климатипов девять (№№ 23, 29, 30, 74, 78, 53, 49, 50, 80) имеют преимущество от 10 до 42 % относительно контроля. По отношению к среднему запасу на участке превышение составляет 0.8–1.9 σ . Остальные шесть климатипов (№№ 9, 35, 37, 52) имеют превышение к среднему запасу 0.4–0.7 σ , они успешны по высоте, форме ствола и устойчивости к патогенам. Преимущество по запасу у перспективных климатипов на суглинистой почве относительно контроля значительно меньше, чем у перспективных климатипов на песчаной.

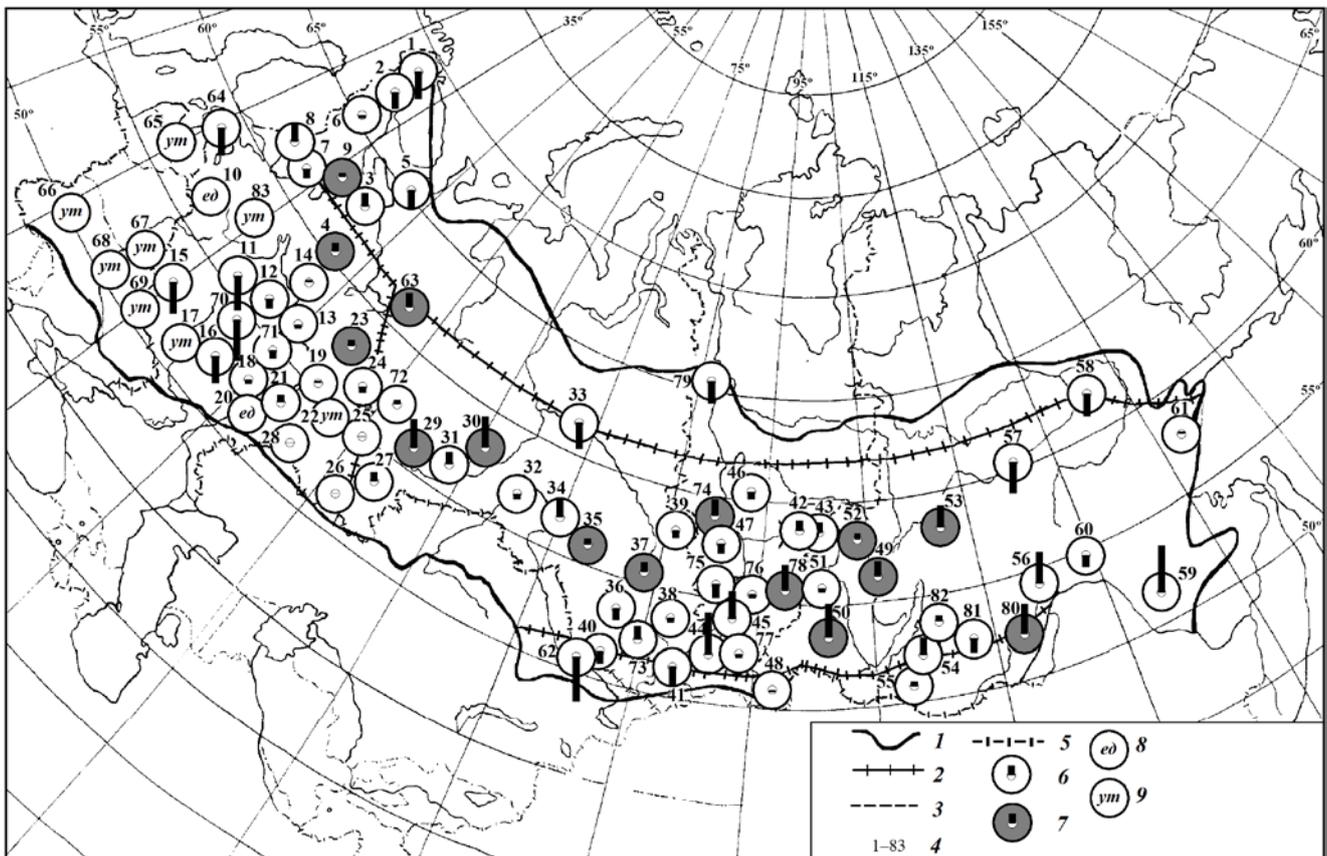


Рисунок 11. Запас стволовой древесины у климатипов сосны в долях σ на участке с суглинистой почвой (1–9 – см. Рисунки 1, 7, 9)

Одной из причин дифференциации климатипов сосны по динамике роста и стволовой продуктивности является разная стратегия их роста в условиях географических культур, которая находится под влиянием наследственных особенностей, сформированных в местах происхождения климатипов, и их адаптивной реакции на экологические факторы в пункте испытания. С увеличением северной широты места происхождения климатипов отмечают разные закономерности: в условиях песчаной почвы увеличиваются средняя высота, диаметр, объем ствола дерева и запас стволовой древесины; в условиях суглинистой почвы – отмечается уменьшение средней высоты, диаметра и объема ствола. С увеличением восточной долготы места происхождения климатипов в условиях песчаной и суглинистой почв географических культур увеличивается запас стволовой древесины.

Значительные различия по высоте и стволовой продуктивности климатипов, выявленные между экспериментальными участками, в первую очередь связаны с плодородием и свойствами почв, их способностью насыщать растительность элементами, необходимыми для развития корней и надземной части растений. Из литературы известно, что более слабое развитие корней растений в пересчете на единицу объема почвы отмечается на высокотрофных почвах, по сравнению с низкотрофными песками (Гаель, Воронков, 1965; Залесов и др., 2004). Основная часть ресурсов растений, произрастающих на песчаных почвах, тратится на развитие корневой системы, способной поддерживать жизнедеятельность растений. В связи с этим, климатипы сосны, тестируемые на бедной песчаной почве и имеющие ограничения при адаптации, значительно уступают по стволовой продуктивности климатипам, тестируемым в условиях темно-серой лесной суглинистой почвы.

ГЛАВА 4. Особенности структуры древесины у климатипов сосны в географических культурах

Исследование динамики радиального прироста у климатипов сосны в условиях песчаной почвы выявило спад прироста с выраженным минимумом в 24–25-летнем возрасте (Рисунок 12). Причиной низких значений приростов является реакция на: недостаток влаги, питательных веществ и воздействие грибных патогенов. Некоторые климатипы, например, чемальский из Республики Алтай, имеют выпадения нескольких годовичных колец подряд. Климатипы из северной и южной тайги демонстрируют относительную устойчивость к стрессовым факторам.

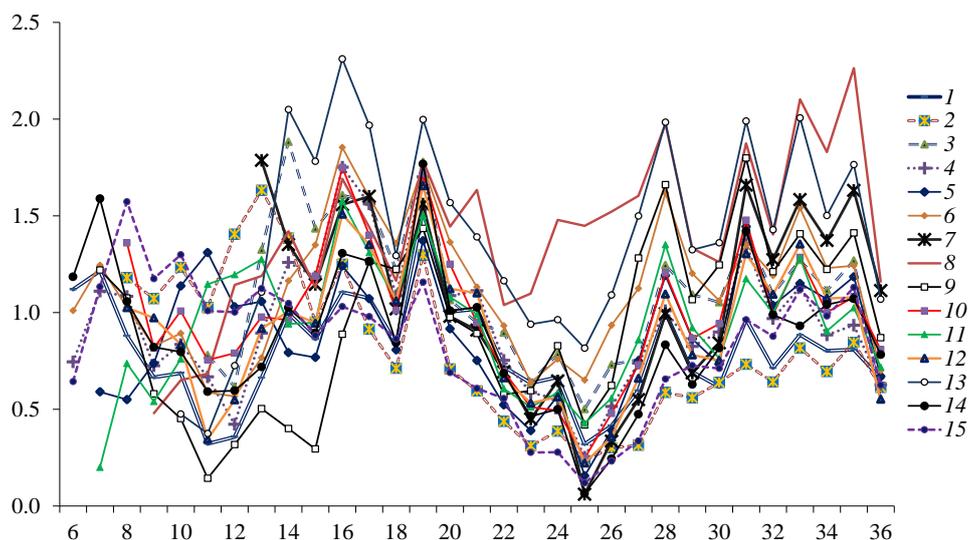


Рисунок 12. Динамика средних значений ШГК у 15 климатипов сосны в условиях песчаной почвы (ось ординат – ШГК, мм; ось абсцисс – возраст деревьев, лет; №№ климатипов: 1 – богучанский; 2 – пинежский; 3 – туруханский; 4 – плесецкий; 5 – балгазынский; 6 – кандалакшский; 7 – чемальский; 8 – енисейский; 9 – заудинский; 10 – усть-кутский; 11 – минусинский; 12 – кяхтинский; 13 – вихоревский; 14 – сузунский; 15 – печенгский) (Кузьмин, 2012)

В условиях суглинистой почвы радиальные приросты у климатипов значительно больше, чем в условиях песчаной (Рисунок 13). Отмечается дифференциация между климатипами по возрасту достижения максимальных приростов (Кузьмин и др., 2013). Так, у плесецкого и богучанского климатипов максимум прироста отмечается в 12-летнем возрасте, у сузунского – в 16-летнем.

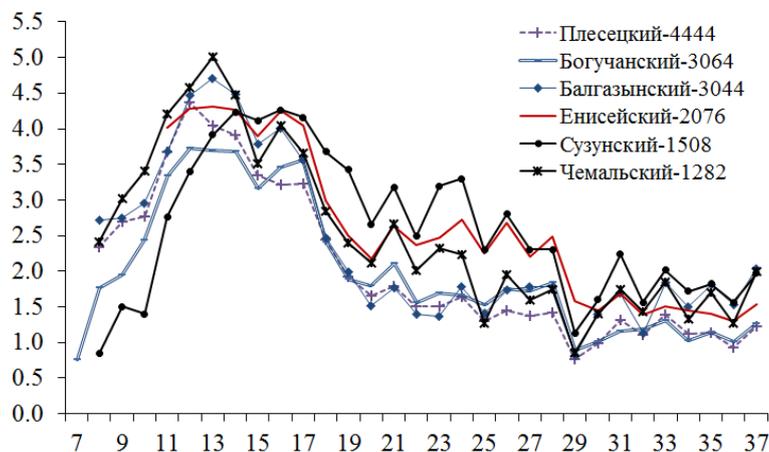


Рисунок 13. Динамика ширины годовичного кольца у климатипов сосны в условиях суглинистой почвы (ось ординат – ширина годовичного кольца, мм; ось абсцисс – возраст деревьев, лет; легенда – климатип-густота, шт./га)

Анализ анатомических характеристик древесины выявил, что северные климатипы имеют меньшие параметры толщины и площади клеточной стенки (ТКС и ПКС) трахеид ранней и поздней древесины, чем южные. Установлено, что

наименьшая ПКС в годичном кольце отмечается у климатипа с наименьшей продолжительностью безморозного периода – пинежского из Архангельской обл. (368 мкм²), наибольшее значение отмечается у климатипа с самым длинным безморозным периодом в пункте его происхождения – чемальского из Республики Алтай (439 мкм²). Различия между ними значимы ($p < 0.001$) (Рисунок 14).

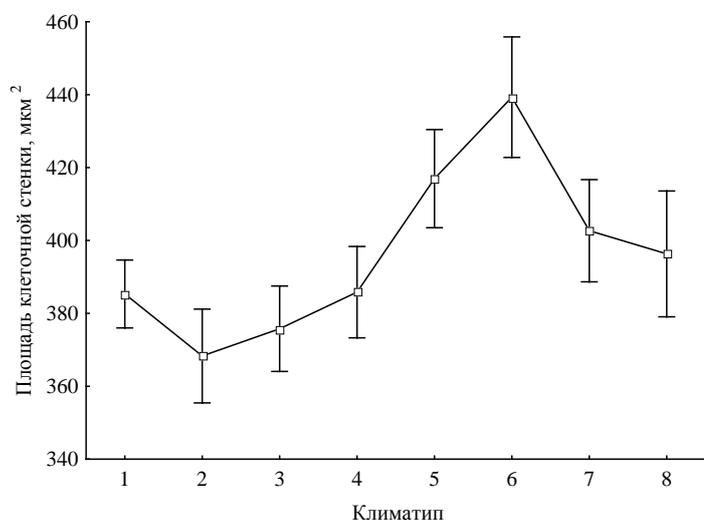


Рисунок 14. Средняя площадь клеточной стенки в годичном кольце у восьми климатипов сосны (1 – кандалакшский; 2 – пинежский; 3 – плесецкий; 4 – богучанский; 5 – енисейский; 6 – чемальский; 7 – балгазынский; 8 – кяхтинский; планки погрешностей – 95 % доверительный интервал)

Между продолжительностью безморозного периода в местах происхождения климатипов и средней ПКС отмечается значимый коэффициент корреляции Спирмена ($r = 0.71$; $p < 0.05$). Все северные климатипы (кандалакшский, пинежский и плесецкий) значимо не отличаются по ПКС от местного богучанского, но отличаются меньшей площадью от енисейского из южной тайги Красноярского края и чемальского ($p < 0.05$ и 0.001). Значимые различия отмечаются между пинежским и южными: балгазынским из Тывы и кяхтинским из Бурятии ($p < 0.05$). Плесецкий климатип из средней тайги Архангельской обл. имеет значимо меньшую площадь клеточной стенки, чем балгазынский ($p < 0.01$).

Использование нормированного к 30 клеткам в годичном кольце ряда трахеид позволило сравнить климатипы по изменению геометрической плотности древесины за вегетационный период. На Рисунке 15 представлены усредненные показатели плотности древесины внутри годичного кольца. В целом, график динамики плотности древесины в годичном кольце демонстрирует наличие индивидуальных особенностей у отдельных климатипов. Южные климатипы отличаются более ранним увеличением плотности древесины в годичном кольце. Так, у балгазынского климатипа стабильное увеличение плотности древесины начинается с 5-ой клетки. Северный кандалакшский климатип до 8-ой клетки имеет снижение плотности, при этом показатели плотности древесины в конце нормированного годичного кольца превышают показатели балгазынского климатипа.

Толщина и площадь клеточной стенки в ранней и поздней древесине являются наиболее значимыми показателями в идентификации различий между климатипами сосны обыкновенной. Меньшие значения показателей отмечаются у северных климатипов, представляющих подвид «лапландская», а относительно крупные их размеры имеют климатипы сосны из теплообеспеченных мест происхождения.

Радиальный диаметр трахеид в древесине у климатипов сосны отражает адаптационную реакцию генотипа на погодные условия в пункте испытания, что подтверждает низкая изменчивость между климатипами, как в ранней, так и поздней

древесине, а также более высокая погодичная изменчивость этого показателя в поздней древесине по сравнению с толщиной клеточной стенки.

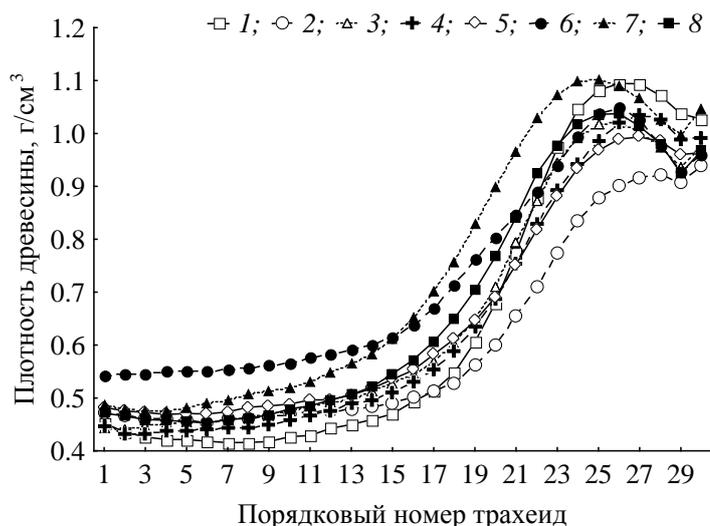


Рисунок 15. Динамика средней геометрической плотности древесины в нормированном ряду годичного кольца у восьми климатипов сосны (1 – кандалакшский; 2 – пинежский; 3 – плесецкий; 4 – богучанский; 5 – енисейский; 6 – чемальский; 7 – балгазынский; 8 – кяхтинский)

По структурным элементам поздней древесины отмечается высокая изменчивость и чувствительность к погодным условиям. Характеристики трахеид поздней древесины зависят от соотношения количества влаги в первой и во второй половинах вегетационного периода. Климатипы подвида сосны «кулундинская» более чувствительны к количеству влаги в течение всего вегетационного периода, что отмечается в формировании годичных колец по типу «ложных» при выпадении большого количества осадков во второй половине вегетационного периода.

Сравнение отклика ШГК и ДП на погодные условия у климатипов, выращиваемых в разных пунктах испытания (Богучаны – южная тайга и Сузун – лесостепь), выявило закономерности. В условиях южной тайги отмечается значимое положительное влияние средней температуры воздуха апреля, мая и августа на ШГК. В лесостепи влияние температуры на ШГК у сравниваемых климатипов только отрицательное. У большинства климатипов в лесостепи отмечается уменьшение ШГК, южные (сузунский, чемальский и балгазынский) отличаются меньшими значениями от северных (плесецкого, енисейского и богучанского). В южной тайге наибольшая ШГК отмечается у сузунского климатипа, а наименьшая у плесецкого. Балгазынский климатип отличается наибольшей ДП, как в южной тайге Нижнего Приангарья, так и в лесостепной зоне Верхнего Приобья. Сравнение климатипов по ДП показало, что в условиях лесостепи этот показатель значимо ($p < 0.001$) увеличивается у всех климатипов (Кузьмин, 2020).

ГЛАВА 5. Дифференциация климатипов сосны по показателям ассимиляционного аппарата и генеративных органов

Размеры хвои и плотность устьиц. Выявлена высокая изменчивость длины хвои в ГК. Коэффициенты индивидуальной изменчивости длины хвои на песчаной почве варьируют от 15 до 32 %. Географическая изменчивость – 15 %. Пределы изменчивости на суглинистой почве варьируют от 11 до 24 %, географическая – 12 %. Размеры длины хвои варьируют: на песчаной почве - от 18.3 мм до 36.2 мм, на суглинистой – от 43.4 до 71.2 мм. Длинная хвоя отмечается у сосны с юга ареала и из лесостепных районов центральной части России, Урала и Сибири, короткая – выявлена в основном у климатипов с территории Европейского Севера и северных территорий Сибири и Дальнего Востока. Некоторые климатипы сосны сохраняют

ранговый статус по длине хвои в разных почвенных условиях, другие его меняют, демонстрируя тем самым разную норму генетической реакции на условия роста. Выявлено, что в условиях песчаной почвы климатипы сосны, представляющие подвид «лапландская» значимо ($p < 0.01$) отличаются наименьшей длиной хвои от климатипов, представляющих «обыкновенную», «сибирскую» и «кулундинскую». Формирование длины хвои у сосны в ГК носит наследственный характер, что подтверждают значимые ($p < 0.001$) коэффициенты корреляции Спирмена между длиной хвои и характеристиками места происхождения климатипов: суммой температур > 10 °C ($r = 0.56$) и географической широтой ($r = -0.53$). Для выборки климатипов из Сибири, расположенных в пределах $81-106^\circ$ восточной долготы, градиент уменьшения длины хвои с увеличением географической широты на 1° составляет 0.76 мм ($r = -0.63$; $p < 0.01$; $R^2 = 0.40$; $n = 22$). Меньшими показателями длины хвои и плотности устьиц отличаются северные климатипы, хвоя у них шире, чем у южных. Для выборки климатипов из европейской части России и Сибири градиент уменьшения плотности устьиц с увеличением широты места происхождения на 1° составляет 1.1 шт./мм² ($r = -0.91$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.83$; $n = 10$).

Продолжительность жизни хвои. Выявлено, что климатипы, являющиеся более продуктивными по высоте в географических культурах, имеют высокую сохранность хвои. Значимые коэффициенты корреляции (от $r = 0.41$; $p < 0.01$ до $r = 0.50$; $p < 0.001$) с высотой, диаметром и объемом ствола, запасом стволовой древесины отмечаются только в условиях песчаной почвы. Для выборки климатипов из Сибири ($n = 15$) с увеличением северной широты на 1° продолжительность жизни хвои увеличивается на 0.1 года ($r = 0.72$; $p < 0.01$; $R^2 = 0.52$). Потомства северных климатипов сосны и из восточной части ареала, материнские древостои которых произрастают в относительно холодных условиях, в пункте испытания географических культур демонстрируют значимо более высокую сохранность хвои. Климатипы подвидов «сибирская» и «лапландская» имеют более долгий срок жизни хвои в условиях песчаной почвы (3.7 и 4.0 года), чем «кулундинская» и «обыкновенная» (3.2 и 3.3 года соответственно).

Охвоенность побегов. Относительно густая охвоенность боковых побегов сосны в географических культурах выявлена у климатипов с небольшими высотами деревьев, имеющими меньшую продолжительностью жизни хвои. Большое число хвои на единицу длины побега и высокая концентрация устьиц способствуют увеличению рисков распространения инфицирования хвои в кроне деревьев грибными патогенами. При благоприятных погодных условиях для развития патогенных грибов это приводит к массовым повреждениям крон у деревьев в насаждении. Выявлены положительные значимые связи охвоенности с общей долей поврежденных деревьев снежным шютте ($r = 0.45$; $p < 0.05$) и долей деревьев с сильной и средней степенью повреждения ценангиевым некрозом ($r = 0.74$; $p < 0.05$). Значимые различия ($p < 0.05$) по охвоенности отмечаются между климатипами подвидов сосны «обыкновенная» (8.6–9.2 шт./см) и «сибирская» (7.2–8.7 шт./см).

Фенология хвои. Исследование фенологических фаз формирования хвои у сосны разного происхождения выявило различия по состоянию вегетативных побегов между контрастными по месту происхождения климатипами, например, кандалакшским из северной тайги Мурманской обл. и балгазынским из подтаёжного пояса Республики Тыва. Более поздний срок начала развертывания хвои отмечается у южного балгазынского климатипа, различия в календарных сроках составляют от

7 до 10 дней. Данные результаты подтверждаются исследованиями продолжительности покоя (Пахарькова и др., 2014).

Исследование компонентного состава летучих веществ в хвое климатипов сосны выявило 64 вещества: 60 обнаружены в газовой фазе, 49 – в эфирном масле (Кузьмин и др., 2020). По 18 веществам, обнаруженным в газовой фазе, установлены значимые различия между устойчивыми и неустойчивыми к грибным патогенам климатипами. Исследование концентраций терпенов, показало наибольшие относительные концентрации α -пинена и 3-карена в общем количестве исследуемых веществ. Анализ концентраций этих веществ в связи с географической широтой места происхождения климатипов выявил, что у южных происхождений отмечается увеличение концентрации 3-карена и уменьшение концентрации α -пинена относительно северных климатипов (Рисунок 16). В литературе отмечается связь летучих веществ с устойчивостью к грибным патогенам, в том числе и положительная связь доли 3-карена с устойчивостью к корневой губке (Чернодубов, Дерюжкин, 1990; Nerg et al., 1994; Тараканов и др., 2004).

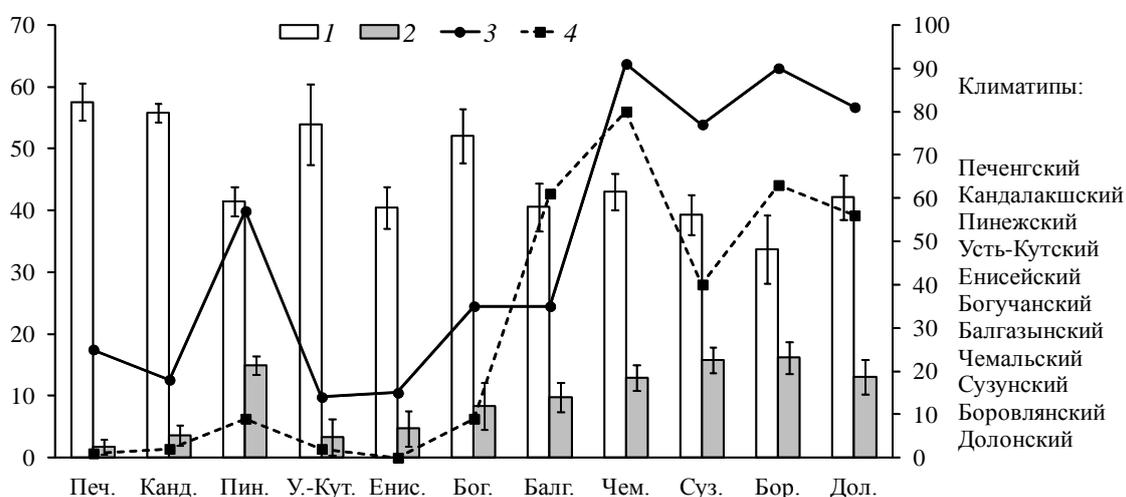


Рисунок 16. Доли (%) α -пинена (1) и 3-карена (2) от общего количества летучих веществ в хвое (левая ось) и доли (%) деревьев поврежденных снежным шютте (3) и сильно поврежденных ценангиевым некрозом (4) (правая ось) у климатипов (погрешности – стандартная ошибка)

Выявлены противоположные по знаку коэффициенты корреляции Спирмена концентраций α -пинена ($r = -0.66$; $p < 0.05$) и 3-карена ($r = 0.75$; $p < 0.01$) с суммой температур > 10 °С мест происхождения климатипов. Северные устойчивые климатипы сосны отличаются относительно большим содержанием α -пинена и меньшим – 3-карена, их соотношение в среднем составляет 11:1. Концентрация α -пинена у южных неустойчивых климатипов по отношению к устойчивым значительно меньше, но содержание 3-карена увеличивается, их соотношение составляет 3:1. Выявленное соотношение концентраций у северных устойчивых и южных неустойчивых климатипов к грибным патогенам в пределах пункта испытания является наследственной особенностью этих климатипов. Компонентный и количественный состав летучих соединений в хвое климатипов сосны обыкновенной связан с их генетическими особенностями, сформированными под действием климатических и экологических факторов в местах происхождения, и оказывает влияние на устойчивость потомств климатипов сосны к грибным патогенам в пункте испытания. Выявленные концентрации летучих веществ

являются дополнительными показателями устойчивости климатипов сосны к некоторым болезням, вызываемым грибными патогенами.

Размеры и форма шишек. В урожаях разных лет, исследуемых с 20-летнего возраста географических культур, средняя длина шишек (ДШ) варьирует от 33.4 мм у якутского климатипа до 46.2 мм у тарского из Омской обл. По средним многолетним размерам мелкие шишки (ДШ < 39.1 мм) отмечаются у климатипов сосны из северных и центральных регионов европейской части ареала, северных районов Урала и Якутии. Крупные шишки (ДШ > 41.5 мм), в основном имеют климатипы из таежных лесов Восточной Сибири, лесостепных и горно-таежных сосняков с юга региона, у ряда климатипов лесостепной зоны Западной Сибири и климатипов с Дальнего Востока. Уровень значимости различий между отдельными климатипами, имеющими мелкие и крупные шишки, очень высокий ($p < 0.001$). Анализ связи размеров шишек с географическими координатами мест происхождения выявил значимые коэффициенты корреляции Спирмена с широтой ($r = -0.33$; $p < 0.05$) и долготой ($r = 0.34$; $p < 0.05$), что свидетельствует о соответствии более длинных шишек южным и восточным климатипам.

Средний индекс формы шишки (ФШ) у климатипов варьирует от 0.45 до 0.59. Выделены три группы шишек: конические (ФШ < 0.48), средние (0.48–0.52) и округлые (ФШ > 0.52). Климатипы с конической формой представляют в основном таежную и лесостепную зону Восточной Сибири. Округлую форму имеют климатипы из лесорастительных зон Европейской части ареала и Западной Сибири. По ФШ у климатипов не выявлено значимой связи с координатами или климатическими характеристиками мест происхождения. Изменчивость ФШ у сосны в ГК имеет локально мозаичный характер, отмеченный А.И. Видякиным с соавт. (Видякин и др., 2010) в природных популяциях.

Масса семян материнских (исходных) насаждений сосны (ИМС) варьирует от 3.27 г до 9.18 г, географическая изменчивость – 20 %. Индивидуальная изменчивость массы семян, собранных в ГК (МС), достигает 26 %, географическая изменчивость – 13 %. Выделены группы с легкими, средними и тяжелыми семенами. Легкие семена (ИМС < 5.26 г) отмечаются у климатипов из тайги Европейского Севера, Тюменской обл., Якутии, подтайги Томской, Иркутской обл., лесостепи Омской и Иркутской обл., горной и южной тайги Восточной Сибири, Бурятии, Забайкальского края, Амурской обл. и Хабаровского края (Рисунок 17).

Тяжелые семена (ИМС > 6.42 г) имеют климатипы из зоны сосновых и лесостепных лесов Украины и Беларуси, подзоны южной тайги, лесостепи и степи южной части центральной России, подтаежных лесов Алтая и Красноярского края, ленточных боров Казахстана и Алтайского края, подтаежных и лесостепных сосновых лесов Красноярского края, Тывы и Бурятии. Выявлена положительная значимая связь ИМС с высотой 6-летних деревьев климатипов сосны, выращенных из этих семян ($r = 0.39$; $p < 0.01$). В 25-летнем возрасте уровень значимости снижается ($r = 0.29$; $p < 0.05$).

Согласно регрессионному анализу коэффициент корреляции линейной зависимости между северной широтой мест происхождения сибирских климатипов ($n = 21$) и ИМС является значимым ($r = -0.78$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.61$). С увеличением северной широты на 1° ИМС уменьшается на 0.27 г. Между ИМС и МС отмечается положительный коэффициент корреляции Пирсона с высоким уровнем значимости ($r = 0.59$; $p < 0.001$; $n = 37$). Чем больше ИМС у климатипов, тем больше МС,

собранных у потомства этих климатипов в географических культурах, что подтверждает наследуемость этого показателя. В абсолютных значениях МС, собранных в 20–30-летнем возрасте, в географических культурах у климатипов сосны превышает ИМС спелых (100–120 лет) насаждений, что косвенно согласуется с мнением исследователей об уменьшении массы семян с увеличением возраста.

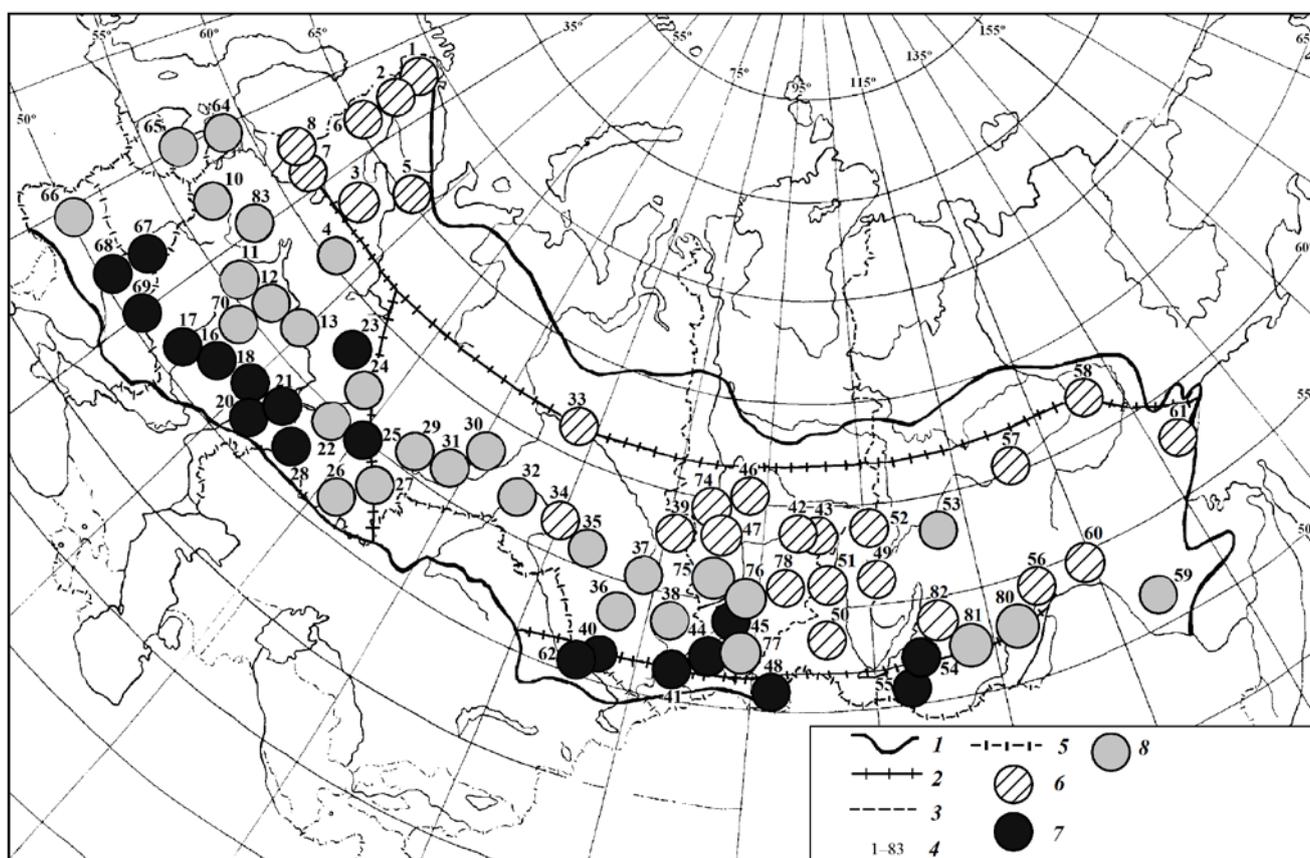


Рисунок 17. Группы климатипов сосны по массе семян материнских насаждений (1–5 – см. Рисунок 1; 6 – легкие; 7 – тяжелые; 8 – средние)

ГЛАВА 6. Устойчивость климатипов сосны к грибным патогенам в географических культурах

Влияние географического происхождения на устойчивость к заболеваниям у климатипов проявилось в 2-летнем возрасте сеянцев в питомнике. Большая доля погибших растений в результате поражения обыкновенным шютте, вызванным сумчатым грибом *Lophodermium pinastri* Chev., имеет выраженную географическую привязку к юго-западной части ареала сосны (Кузьмина, Кузьмин, 2007б, 2009).

Заболевание сосны снежным шютте, возбудителем которого является сумчатый гриб *Gremmenia infestans* (P. Karst.) Crous, отмечалось в 8-летнем возрасте. Между климатипами выявлены значительные различия по доле поврежденных деревьев. Повреждения разной интенсивности, охватившие более 50 % деревьев в блоке каждого климатипа, отмечались в основном у сосны из западных, юго-западных и центральных районов ареала вида. Это климатипы с территории Прибалтики, Украины, Республики Беларусь, европейской части России. Климатипы с Урала, Казахстана, южных и лесостепных районов Сибири, также имели 50–90 % пораженных деревьев. В результате повреждений происходила элиминация верхушечной почки и более 60 % хвои в кроне деревьев. Относительно устойчивыми к снежному шютте оказались климатипы из Средней и Восточной Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока и с Европейского Севера. Большая доля

здоровых деревьев (более 80 %) отмечалась у потомств сосны Якутии, Мурманской и Иркутской обл., Республики Коми, Красноярского, Забайкальского и Хабаровского краев. После болезни у поврежденных деревьев, представляющих климатипы подвидов «обыкновенная» из Европейской части России и «кулундинская» из ленточных и степных боров Казахстана и Южной Сибири, отмечались низкие показатели прироста.

В возрасте 23–25 лет зафиксировано заболевание – ценангиевый некроз, возбудителем являлся гриб *Cenangium ferruginosum* Fr. Анализ состояния вегетативных частей крон деревьев выявил различия между климатипами по степени и доле пораженных деревьев. Лучшей сопротивляемостью отличались климатипы из северных районов европейской части России и Сибири, Забайкальского края и Якутии. Климатипы этих регионов имели от 10 до 50 % поврежденных деревьев. Менее устойчивыми климатипами, имеющими сильную и среднюю степень повреждения хвои, оказались происхождения из центральных районов России, ряда районов Поволжья, Урала и южных районов Сибири. Встречаемость поврежденных деревьев у них варьирует от 50 до 80 % (Рисунок 18).

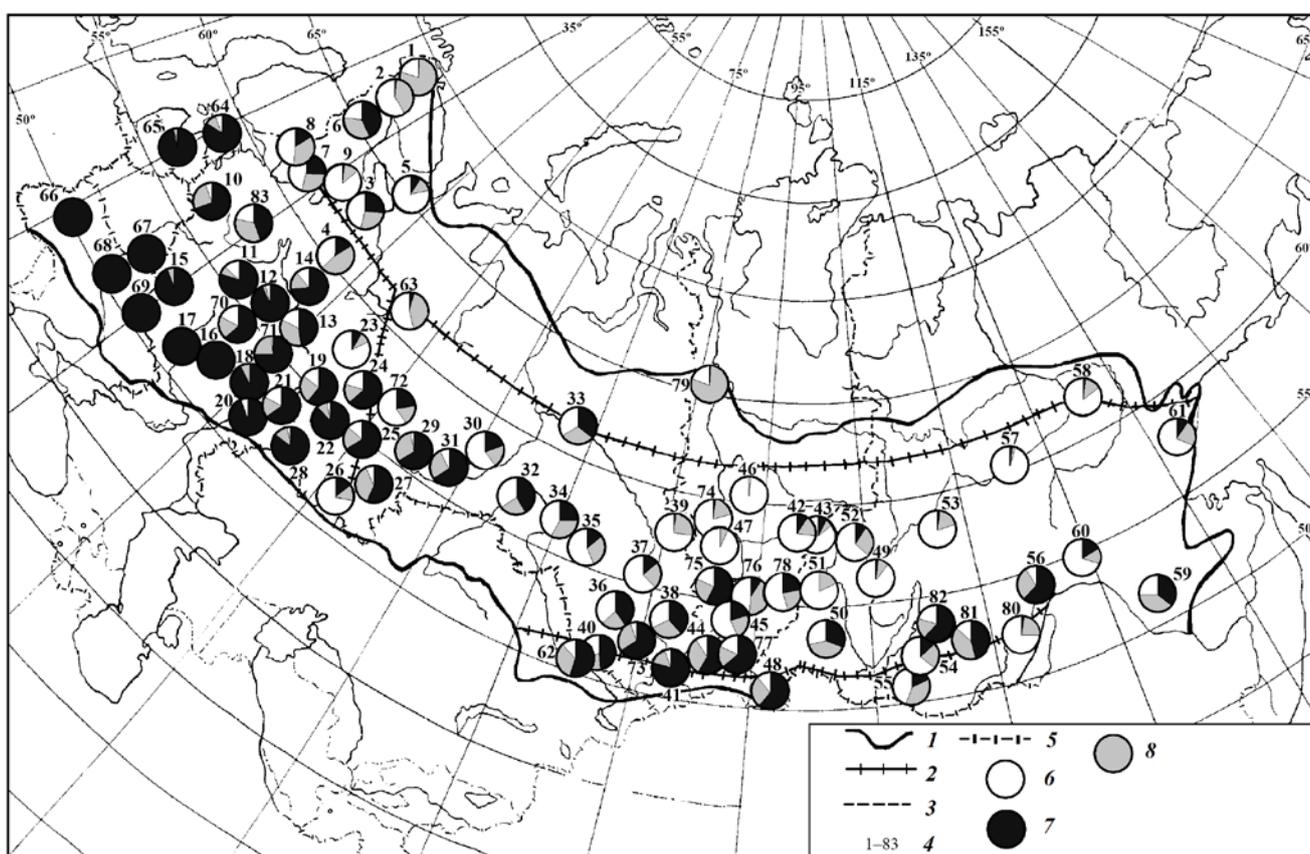


Рисунок 18. Степень повреждения у климатипов сосны ценангиевым некрозом в условиях песчаной почвы (1–5 – см. Рисунок 1; 6 – доля здоровых и слабо поврежденных деревьев, %; 7 – доля сильно поврежденных деревьев, %; 8 – доля средне поврежденных деревьев, %)

Самая низкая устойчивость к патогену отмечалась у климатипов сосны из Прибалтики, Украины, Беларуси (№№ 64–69), южных районов России (№№ 10–20), а также у сосны с Урала и Поволжья (№№ 19–25, 27–29). Климатипы этой группы имели массовый характер поражения хвои сильной и средней степени тяжести (80–100 % пораженных деревьев). Доля деревьев с сильной и средней степенью поражения хвои в результате ценангиевого некроза, как и в случае поврежденных деревьев снежным шютте, проявляет себя как показатель, связанный с

особенностями происхождения климатипов сосны. Ранговый корреляционный анализ показал значимые положительные связи этого признака с длиной вегетационного ($r = 0.67$; $p < 0.001$) и безморозного ($r = 0.56$; $p < 0.001$) периодов, с ИМС ($r = 0.51$; $p < 0.001$), означающими, что устойчивость климатипов к болезням обусловлена климатическими и географическими факторами их мест происхождения. Связь показателя с географическими координатами происхождения – широтой ($r = -0.51$; $p < 0.001$) и долготой ($r = -0.52$; $p < 0.001$), показывает закономерную изменчивость устойчивости климатипов. Северные и восточные климатипы характеризуются меньшей долей деревьев с сильной и средней степенью повреждения ценангиевым некрозом по сравнению с южными и западными.

В условиях темно-серой лесной почвы отмечаются повреждения сосны раком-серянкой. Заболевание вызывается грибами-ржавчинниками (*Cronartium pini* (Willd.) Jørst.). Наибольшую долю пораженных деревьев (4–10 %) имеют климатипы из степных, лесостепных районов Поволжья, юга Урала, Казахстана и юга Сибири (дюртюлинский из Башкортостана, курганский из Курганской обл., долонский из Казахстана, кяхтинский из Бурятии, ракистовский с Алтайского края). Меньшая встречаемость пораженных деревьев (1–3 %) отмечается у климатипов сосны из южно-таежной подзоны европейской части России (Тамбовской, Костромской, Ульяновской обл., Татарстана, Удмуртии, Башкортостана и Томской обл.). Климатипы из Иркутской обл. и Красноярского края (катангский и енисейский) имеют 2.1 и 3.7 % пораженных деревьев этим патогеном. Минимальное количество пораженных деревьев отмечается у климатипов с территории северной, средней и южной тайги Европейского Севера.

Установлено, что устойчивые к грибным болезням климатипы имеют короткую хвою с меньшим числом устьиц, относительно большими значениями продолжительности ее жизни (Кузьмин, Кузьмина, 2015) и отношения α -пинена к 3-карену. Данные особенности хвои выявлены у климатипов из северных регионов: печенгского, кандалакшского, корткеросского, туруханского, енисейского, северо-енисейского, богучанского, усть-кутского, катангского и аянского. Эти климатипы в меньшей степени подвержены грибным заболеваниям по сравнению с потомством из западных и южных районов ареала сосны. Выявленная отрицательная связь доли поврежденных деревьев с суммой годовых осадков ($r = -0.40$; $p < 0.01$) подтверждает, что потомства растений из регионов с большим количеством осадков лучше адаптируются в пункте испытания к контакту с грибными патогенами.

ГЛАВА 7. Выделение лесосеменных районов сосны обыкновенной в Сибири на основе оценки роста географических культур

Итоговой оценкой роста климатипов сосны в географических культурах является усредненный показатель по комплексу признаков, выраженных в долях стандартного отклонения от средних значений сохранности, высоты и диаметра, объема ствола и запаса древесины, формы ствола и фитопатологического состояния в период эпифитотии. Усредненный показатель назван критерием успешности роста (КУР). В условиях песчаной почвы КУР у климатипов варьирует от -1.8σ до $+2.1\sigma$, у контроля составляет $+0.4\sigma$, в условиях суглинистой — от -1.5σ до $+1.1\sigma$, у контроля $+0.3\sigma$. По средним значениям, как отдельных исследуемых признаков, так и по КУР, выделена 21 группа, в пределах которых у климатипов отмечаются близкие значения усредненного показателя (Рисунок 19).

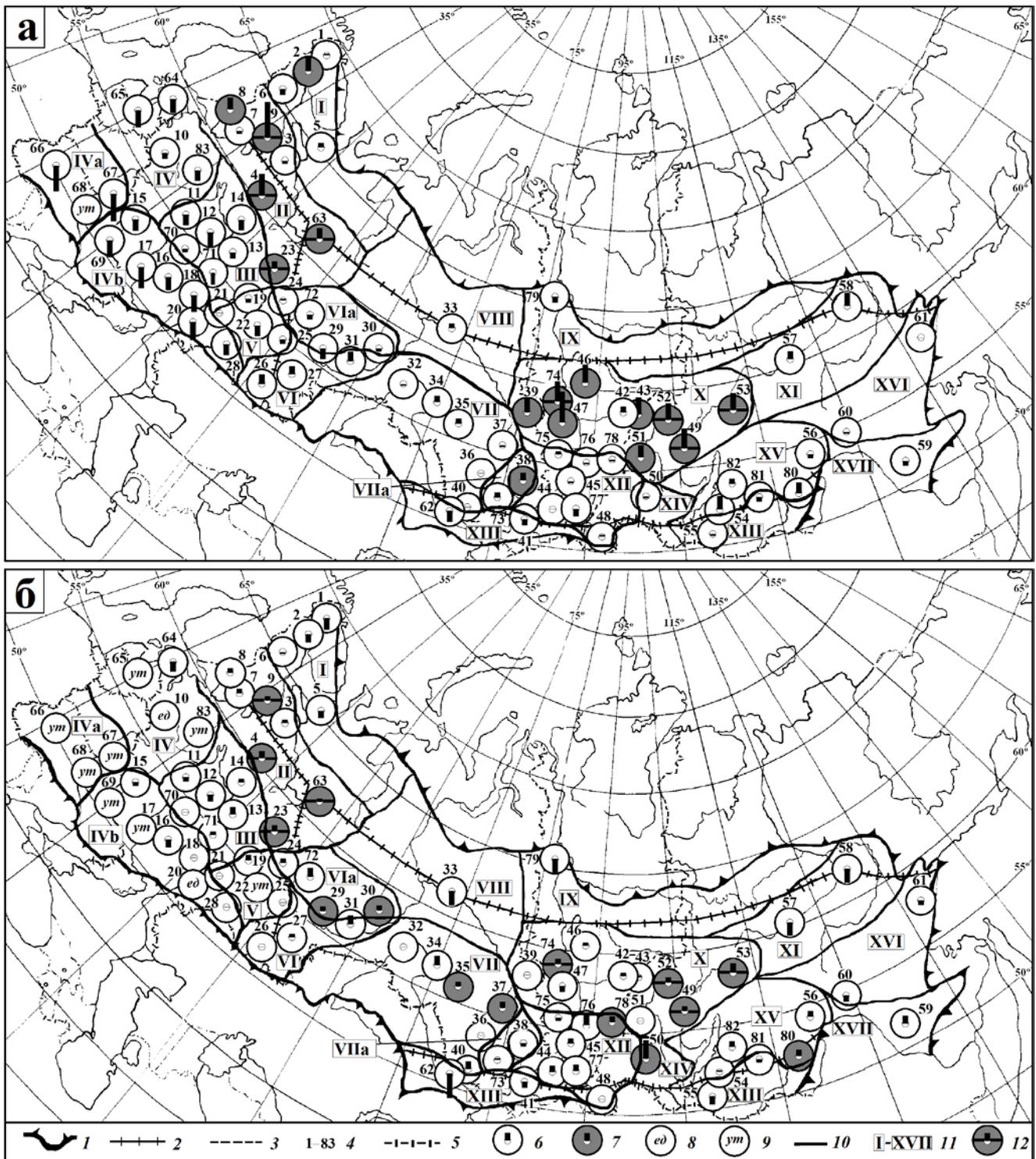


Рисунок 19. Успешность роста климатипов сосны по комплексу признаков в долях σ на участках с песчаной (а) и суглинистой (б) почвами (1–9 – см. Рисунки 1, 8, 9; 10 – границы групп климатипов; 11 – номера территорий выделенных групп; 12 – перспективные климатипы на двух участках

Выделенные группы представляют определенные географические территории в ареале сосны, на Рисунке 19 они показаны условными линиями и обозначены римскими цифрами. Между выделенными группами отмечают различия по итоговой оценке. Климатипы сосны с территорий европейской части России выделены в шесть групп (I–IV, IVa, IVb); с Урала – в три (V, VI, VIa); в Западной Сибири – в четыре (VII, VIIa, VIII, XIII); в Восточной Сибири – в шесть (IX–XIV) групп (XIII группа представляет популяции на юге ареала сосны в Западной и Восточной Сибири). Климатипы с Забайкалья и Дальнего Востока представляют три группы (XV–XVII).

В пределах некоторых выделенных групп отмечаются климатипы (Рисунок 19), имеющие значимые преимущества относительно контроля и средних значений на участках. Среди перспективных климатипов, выделенных на разных почвах, отобраны восемь с широкой нормой адаптивной реакции к экологическим факторам. К ним относятся климатипы: из Карелии (№ 9), Республики Коми (№ 63), Вологодской (№ 4), Кировской (№ 23) и Иркутской обл. (№ 49, № 52, № 53), Красноярского края (№ 74). Данные климатипы имеют высокие или на уровне контроля показатели роста и устойчивости в разных лесорастительных условиях в географических культурах. Положительный КУР на песчаной почве у них варьирует от 0.6σ до 2.1σ , на суглинистой – от 0.3σ до 0.6σ .

Анализ групп климатипов по критерию успешности роста позволил выделить пять лесосеменных районов (ЛСР) на территориях Красноярского края, Иркутской обл., Якутии, Хакасии и Тывы: 1. Туруханско-Эвенкийский, 2. Ангаро-Ленский, 3. Саянский, 4. Иркутский, 5. Якутский (Рисунок 20).

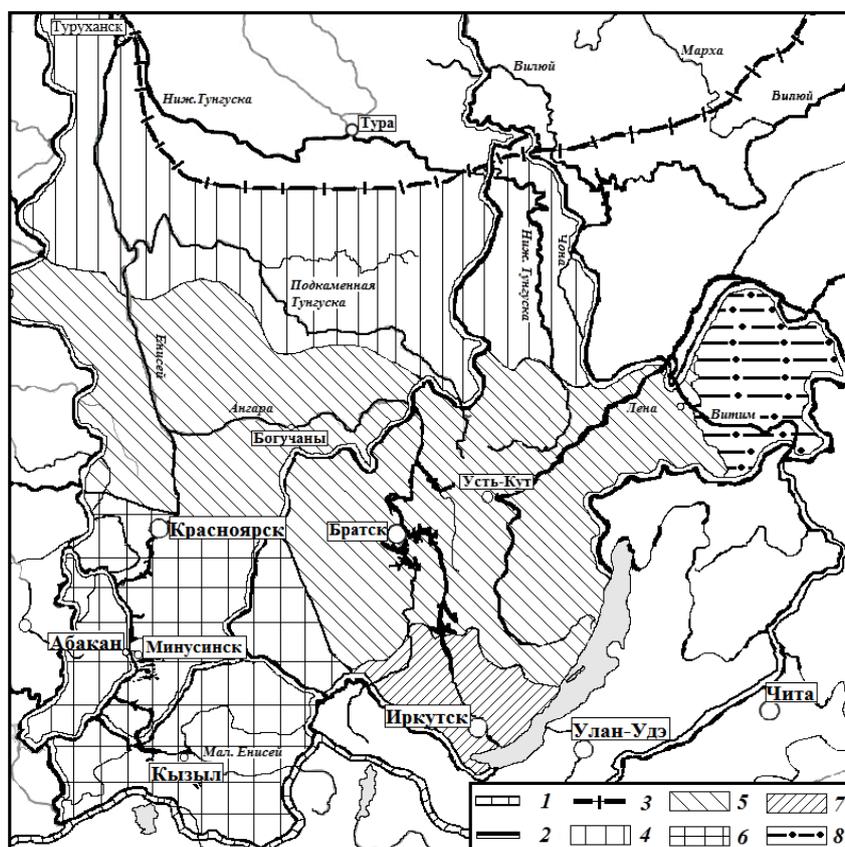


Рисунок 20. Лесосеменные районы сосны обыкновенной в Сибири, выделенные на основе результатов исследования географических культур (1 – граница государств; 2 – граница регионов России; 3 – северная граница ареала сосны обыкновенной; районы: 4 – Туруханско-Эвенкийский; 5 – Ангаро-Ленский; 6 – Саянский; 7 – Иркутский; 8 – Якутский) (Кузьмин, Кузьмина, 2020б)

«Туруханско-Эвенкийский» ЛСР занимает территории Туруханского, Эвенкийского, Байкитского и Тунгусско-Чунского лесничеств Красноярского края и северную и среднюю часть Катангского лесничества Иркутской обл. По районированию 1982 г. (Лесосеменное районирование ..., 1982) этот район соответствует ЛСР № 43 с его подрайонами, по районированию 2015 г. рассматриваемая территория является частью ЛСР № 10 и № 15.

«Ангаро-Ленский» ЛСР в сравнении с районированием 1982 г. представляет расширенную территорию № 56 Ангаро-Илимского ЛСР за счет частично прилегающих к нему районов и подрайонов: № 47 – Средне-Енисейского (а, б); №

48 – Тунгусского (а, б, в); № 57 – Верхне-Ленского (а); № 58 – Южно-Ангарского (а, б); № 55 – Томского (б, г). Основанием для этого расширения является успешный рост и устойчивость климатипов сосны (№№ 39, 74, 42, 43, 47, 46, 52, 51, 49, 53) с присоединенных территорий в пункте испытания географических культур. По действующему районированию территория «Ангаро-Ленского» ЛСР состоит в основном из фрагментов ЛСР №№ 11, 13, 15, 16, 19.

«Саянский» ЛСР представляют популяции сосны юга Красноярского края, юго-западной части Иркутской обл. (южная часть Нижнеудинского лесничества), Хакасии и Тывы. Популяции этого района имеют относительно успешные показатели роста в условиях суглинистой почвы и менее успешные (относительно климатипов Ангаро-Ленского ЛСР) в условиях песчаной почвы. Границы Саянского ЛСР сохраняются примерно в границах ЛСР № 60 с подрайонами по районированию 1982 г., за исключением северной границы, которая проходит немного севернее, ориентиром являются климатипы №№ 75 и 78. В Саянский ЛСР включены Минусинский и Центрально-Тувинский (№ 71 и 72 по 1982 г.) ЛСР. Относительно действующего районирования данная территория частично соответствует фрагментам четырех ЛСР (№№ 13, 14, 16, 17). Среди всех сосняков Саянского ЛСР выделяется популяция сосны балгазынского бора (Тыва), представляющая подвид «кулундинская» по Л.Ф. Правдину. Критерий успешности роста балгазынского климатипа в условиях песчаной почвы отмечается на уровне контрольного варианта, и является лучшим результатом среди всех популяций Саянского ЛСР и популяций сосны «кулундинской». Также, сосну балгазынского климатипа отличают относительно крупные по размеру шишки, собранные в ГК.

«Иркутский» лесосеменной район представляют сосновые леса юго-западной предбайкальской территории Иркутской обл., что соответствует ЛСР № 18 действующего лесосеменного районирования. К «Якутском» району, выделенному на территории Иркутской обл., отнесены сосняки Бодайбинского лесничества, а также сосняки с территории Якутии – олекминский и якутский климатипы. Выделенная территория Якутского района является фрагментом ЛСР № 49–51 по районированию 1982 г. и фрагментом ЛСР № 20 действующего лесосеменного районирования. Между лесосеменными районами отмечаются различия по КУР, длине и продолжительности жизни хвои, массе семян. Значимые различия выявлены между популяциями сосны Ангаро-Ленского ЛСР и популяциями Саянского ЛСР по критерию успешности роста ($p < 0.001$), массе семян ($p < 0.001$), длине и продолжительности жизни хвои ($p < 0.05$).

Результаты оценки внутривидовой дифференциации сосны по критерию успешности роста, показателям хвои и массе семян в ГК позволяют уточнить состав климатических экотипов, выделенных А.И. Ирошниковым (1974) в Сибири. Так, на территории Средней и частично Восточной Сибири рекомендуется Ангаро-Ленский климатический экотип взамен Ангарского и Верхнеленского. Среди популяций кулундинского климатического экотипа к обособленному выделению рекомендуется балгазынская популяция сосны.

Пересмотр границ перемещения семян является обычной мировой практикой с появлением новых научных данных по испытанию происхождений в ГК. На территории Канады после появления новых результатов испытаний число семенных зон в прибрежных районах сократилось с 15 до 4, в пределах внутриконтинентальных – с 42 до 21 зоны (Morgenstern, 1996). На территории

России число ЛСР сократилось с 63 (примерно), по районированию 1982 г., до 25 по районированию 2015 г. В декабре 2022 г. Рослесхозом опубликован новый приказ об установлении лесосеменного районирования, основные изменения в котором связаны с добавлением субъектов Российской Федерации. С увеличением возраста ГК и появлением новой информации по испытанию климатипов уточнение лесосеменного районирования сосны обыкновенной в регионах может продолжаться.

ВЫВОДЫ

1. Рост в высоту и стволовая продуктивность сосны обыкновенной в пункте испытания географических культур зависят от лесорастительных условий экспериментальных участков и в первую очередь от почвенного плодородия. Одноименные климатипы сосны, тестируемые в условиях суглинистой и песчаной почв, имеют двукратные различия по высоте и более чем трехкратные – по запасу стволовой древесины. В пределах экспериментальных участков дифференциация сосны по росту обусловлена наследственными особенностями климатипов, сформированными под действием экологических факторов в местах происхождения и разной адаптивной реакцией на экологические факторы в пункте испытания.

2. Закономерности в изменчивости и дифференциации климатипов сосны по высоте и запасу стволовой древесины по-разному проявляются в условиях песчаной и суглинистой почв: чем севернее места происхождений климатипов, тем ниже средняя высота в условиях суглинистой почвы и выше высота и запас в условиях песчаной. С увеличением географической долготы места происхождения климатипов увеличивается запас стволовой древесины в разных почвенных условиях испытания, значимое увеличение остальных показателей отмечается на песчаной почве. Выявлено, что в условиях песчаной почвы увеличиваются высота и запас стволовой древесины у климатипов с меньшими суммами активных температур, осадков, меньшей продолжительностью вегетационного и безморозного периодов в местах их происхождения. В условиях суглинистой почвы значимых зависимостей высоты и запаса от климатических характеристик не выявлено.

3. Ранговая нестабильность по средней высоте у климатипов продолжает сохраняться до 40-летнего возраста в разных лесорастительных условиях. Процесс формирования структуры насаждения у климатипов имеет специфические особенности, связанные с наследственными свойствами и разной адаптивной реакцией на внешнюю среду. Относительно стабильный рост в высоту, в последние 15–20 лет, отмечается у перспективных климатипов – кандидатов в сорта-популяции и у медленнорастущих, стабильно отстающих от контроля.

4. Сохранность сосны на песчаной почве более чем в два раза превышает сохранность на суглинистой, что связано с трудно учитываемыми факторами при посадке и уходе, в связи с разной степенью зарастания травянистой растительностью. Значимым фактором, влияющим на адаптацию и успешность выживания сосны, является степень соответствия климатических и лесорастительных условий места происхождения климатипов условиям в пункте их испытания. Сохранность на уровне контроля и выше отмечается у климатипов сосны с Европейского Севера России, Северного Урала, таежных и лесостепных районов Сибири, Забайкалья и Якутии. Низкая сохранность отмечается у сосны с

территории западных, южных районов европейской части России и ближнего зарубежья.

5. Структурные элементы древесины – толщина, площадь клеточной стенки и плотность, являются значимыми показателями при оценке различий между климатипами сосны и отборе перспективных климатипов для селекционно-исследовательских работ. Меньшие показатели толщины и площади клеточной стенки выявлены у северных климатипов, представляющих подвид «лапландская». Высокая плотность ранней древесины отмечается у климатипов из предгорных территорий на юге ареала. Лесорастительные и климатические условия в пунктах испытания климатипов сосны оказывают значимое влияние на долю поздней древесины. В южной тайге доля поздней древесины у большей части климатипов значимо ниже, чем у тех же климатипов в условиях лесостепи.

6. Результаты дифференциации сосны по критерию успешности роста, показателям хвои и массе семян в географических культурах уточняют составы лесосеменных районов действующего лесосеменного районирования и климатических экотипов, выделенных ранее А.И. Ирошниковым в Сибири. Рекомендуются Ангаро-Ленский климатический экотип взамен Ангарского и Верхнеленского. Среди популяций кулундинского климатического экотипа к обособленному выделению рекомендуется балгазынская популяция сосны. В соответствии с географическим происхождением климатипов на территории Сибири, в направлении с юга на север градиент уменьшения длины хвои на 1 градус широты составляет 0.76 мм, массы семян – 0.27 г, продолжительность жизни хвои увеличивается на 0.1 года.

7. По резистентности к заболеваниям, вызванным грибными патогенами, выявлены значимые различия между климатипами сосны из таежных зон северных регионов и климатипами из лесостепных и степных лесов, как европейской, так азиатской частей ареала. Степень поражения снежным шютте и ценангиевым некрозом у климатипов связана со степенью схожести между климатическими факторами их места происхождения и условиями пункта испытания. Климатипы сосны из южных широт с высокими температурами и продолжительным вегетационным периодом имеют высокую степень восприимчивости к болезням в пункте испытания. Устойчивыми в географических культурах являются климатипы сосны с территории Европейского Севера, Восточной Сибири и Дальнего Востока.

8. Сопrotивляемость климатипов сосны к воздействию грибных патогенов зависит от комплекса факторов. Существенными из них являются морфологические и физиологические особенности хвои, состав и количество летучих соединений. Устойчивые северные климатипы отличаются относительно большим содержанием α -пинена и меньшим – 3-карена, их соотношение в среднем составляет 11:1, у неустойчивых южных климатипов – 3:1.

9. По высоте и стволовой продуктивности, форме ствола и устойчивости к патогенам отобраны перспективные климатипы сосны на песчаной и суглинистой почвах. Среди отобранных только восемь климатипов являются лучшими в разных лесорастительных условиях и рекомендуются в качестве кандидатов в сорта-популяции. В настоящее время часть из них проходят дополнительное испытание в Красноярской лесостепи. На основе итоговой оценки успешности роста климатипов проведено уточнение лесосеменных районов сосны обыкновенной на территории Средней и частично Восточной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования роста и устойчивости сосны обыкновенной в географических культурах демонстрируют внутривидовую дифференциацию, обусловленную генетическими особенностями климатических экотипов, эволюционно сформированных под действием экологических и климатических факторов в местах происхождения и разной адаптивной реакцией на условия в пункте испытания. Оценка динамики роста сосны в онтогенезе выявляет неустойчивое ранговое положение определенной части климатипов и обеспечивает объективный отбор стабильно перспективных климатипов по комплексу признаков. Степень успешности роста сосны в географических культурах ограничивается наследственными особенностями климатипов и экологическими факторами биотического и абиотического характера в пункте испытания. Выявленные различия по стволовой продуктивности у климатипов сосны в разных почвенных условиях географических культур подтверждают значимость соответствия лесорастительных условий в пункте испытания и местах происхождения семян для создания плантаций и лесных культур.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате изучения географических культур предлагаются следующие рекомендации для лесного хозяйства региона:

1. В рамках уточнения действующего лесосеменного районирования на территории Средней и частично Восточной Сибири выделены пять лесосеменных районов: Туруханско-Эвенкийский, Ангаро-Ленский, Саянский, Иркутский и Якутский.

2. В случае хронического отсутствия семян сосны обыкновенной в регионе, поставщиками семян для создания плантаций и лесных культур целевого назначения, наряду с сосняками Богучанского района, могут использоваться материнские насаждения восьми климатипов, выделенных кандидатами в сорта-популяции. Их представляют сосняки четырех лесничеств из южно-таежных и подтаежных лесов с территории Красноярского края и Иркутской области (Нижне-Енисейское, Усть-Кутское, Катангское, Мамское) и четырех лесничеств из среднетаежных лесов Карелии и Республики Коми (Пудожское, Корткеросское) и южно-таежных лесов Вологодской и Кировской областей (Тотемское, Слободское).

3. Материнские насаждения 16 перспективных климатипов, отобранных в географических культурах на песчаной почве и 15, отобранных на суглинистой почве, рекомендуются для использования в качестве поставщиков семян для создания плантаций и лесных культур целевого назначения строго в соответствии с почвенными и лесорастительными условиями создаваемых объектов в регионе.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК (и приравненных к ним)

1. Кузьмина, Н.А. Дифференциация сосны обыкновенной по росту и выживаемости в географических культурах Приангарья / Н.А. Кузьмина, С.Р. Кузьмин, Л.И. Милютин // Хвойные бореальной зоны. – 2004. – Выпуск 2. – С. 48–56.

2. Кузьмин, С.Р. Анатомические характеристики годичных колец у сосны обыкновенной в географических культурах Приангарья / С.Р. Кузьмин, Е.А. Ваганов // Лесоведение. – 2007. – № 4. – С. 3–12.

3. Кузьмина, Н.А. Особенности генеративных органов сосны обыкновенной разного происхождения в географических культурах / Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин** // Хвойные бореальной зоны. – 2007а. – Т. XXIV. – № 2–3. – С. 225–234.
4. Кузьмина, Н.А. Устойчивость сосны обыкновенной разного происхождения к грибным патогенам в географических культурах Приангарья / Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин** // Хвойные бореальной зоны. – 2007б. – Т. XXIV. – № 4–5. С. 454–460.
5. **Кузьмин, С.Р.** Особенности трахеид древесины у климатипов *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) в географических культурах / **С.Р. Кузьмин**, Е.А. Ваганов, Н.А. Кузьмина, Л.И. Милютин // Ботанический журнал. – 2008. – Т. 93, – № 1. – С. 10–21.
6. Кузьмина, Н.А. Селекция сосны обыкновенной по устойчивости к грибным патогенам в географических культурах / Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин** // Хвойные бореальной зоны. – 2009. – Т. XXVI. – № 1. – С. 76–81.
7. **Кузьмин, С.Р.** Плотность устьиц хвои сосны обыкновенной в географических культурах Приангарья / **С.Р. Кузьмин**, Е.А. Ваганов, Н.А. Кузьмина, Л.И. Милютин, П.П. Силкин // Лесоведение. – 2009. – № 2. – С. 35–40.
8. Пономарева, Т.В. Влияние влагозапасов почвы на рост видов хвойных в условиях эксперимента / Т.В. Пономарева, Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин** // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 12 (39). – С. 45–49.
9. Кузьмина, Н.А. Отбор перспективных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах в Красноярском Приангарье / Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин** // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Т. XXVII. – № 1–2. – С. 115–119.
10. **Кузьмин, С.Р.** Реакция хвойных на изменение почвенной влаги: результаты эксперимента / **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина, Т.В. Пономарева, Г.В. Кузнецова // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Т. XXVII. – № 1–2. – С. 108–114.
11. Милютин, Л.И. О внутривидовой систематике *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) / Л.И. Милютин, **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина, Т.Н. Новикова // Ботанический журнал. – 2010. – №12. – С. 1755–1762.
12. **Кузьмин, С.Р.** Влияние контролируемых изменений почвенной влаги на рост и анатомию древесных видов хвойных / **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина, Е.А. Ваганов, Т.В. Пономарева, Г.В. Кузнецова // Лесоведение. – 2011. – № 4. – С. 30–38.
13. **Кузьмин, С.Р.** Плотность устьиц хвои в разных частях кроны *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) / **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина, Е.А. Ваганов // Ботанический журнал. – 2012. – Т. 97. – №2. – С. 145–160.
14. **Кузьмин, С.Р.** Динамика радиального роста сосны обыкновенной в географических культурах на дерново-подзолистой песчаной почве / **С.Р. Кузьмин** // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – Т. XXX. – № 1–2. – С. 106–110.
15. Кузьмина, Н.А. Анализ лесосеменного районирования сосны обыкновенной в Средней Сибири / Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин** // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – Т. XXX. – № 1–2. – С. 111–113.
16. **Кузьмин, С.Р.** Динамика роста сосны обыкновенной в географических культурах / **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина, Е.А. Ваганов // Лесоведение. – 2013. – № 1. – С. 30–38.
17. Пахарькова, Н.В. Морфофизиологические особенности хвои у разных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах / Н.В. Пахарькова, Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин**, А.А. Ефремов // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 1. – С. 107–113. [Pakharkova, N.V. Morphophysiological traits of needles in different climatypes of Scots pine in provenance trial / N.V. Pakharkova, N.A. Kuzmina, **S.R. Kuzmin**, A.A. Efremov // Contemporary Problems of Ecology. – 2014. – Vol. 7. – № 1. – P. 84–89.] (WOS, Scopus)
18. Кузьмина, Н.А. Распространение шютте в насаждениях сосны обыкновенной в Средней Сибири / Н.А. Кузьмина, В.А. Сенашова, **С.Р. Кузьмин** // Лесоведение. – 2014. – № 6. – С. 49–55. [Kuzmina, N.A. Distribution of *Lophodermium* needle cast agents in Scots pine stands

in Middle Siberia / N.A. Kuzmina, V.A. Senashova, **S.R. Kuzmin** // Contemporary problems of Ecology. – 2015. – Vol. 8. – № 7. – P. 909–915.] (WOS, Scopus)

19. **Кузьмин, С.Р.** Морфологические особенности хвои у сосны обыкновенной с разной устойчивостью к грибным болезням / **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина // Экология. – 2015. – № 2. – С. 156–160. [**Kuzmin, S.R.** Morphological distinctions of needles in Scots pine with various resistance levels to fungal diseases / **S.R. Kuzmin**, N.A. Kuzmina // Russian Journal of Ecology. – 2015. – Vol. 46. – № 2. – P. 209–212.] (WOS, Scopus)

20. Чебакова, Н.М. Оценка климатических границ ареала шютте обыкновенного при изменении климата в Средней Сибири / Н.М. Чебакова, Н.А. Кузьмина, Е.И. Парфенова, В.А. Сенашова, **С.Р. Кузьмин** // Сибирский экологический журнал. – 2016. – № 6. – С. 855–865. [Tchebakova, N.M. Assessment of climatic limits of needle cast-affected area under climate change in Central Siberia / N.M. Tchebakova, N.A. Kuzmina, E.I. Parfenova, V.A. Senashova, **S.R. Kuzmin** // Contemporary problems of Ecology. – 2016. – Vol.9. – № 6. – P. 721–729.] (WOS, Scopus)

21. **Кузьмин, С.Р.** Радиальный рост и доля поздней древесины у сосны обыкновенной в географических культурах в Западной и Средней Сибири / **С.Р. Кузьмин**, Р.В. Роговцев // Сибирский лесной журнал. – 2016. – № 6. – С.113–125.

22. Tchebakova, N.M. Potential climate-induced distributions of *Lophodermium* needle cast across central Siberia in the 21 century / N.M. Tchebakova, N.A. Kuzmina, E.I. Parfenova, V.A. Senashova, **S.R. Kuzmin** // Web Ecology. – 2016. – Vol. 16. – P. 37–39. (WOS, Scopus)

23. Кузьмина, Н.А. Анализ динамики роста климатипов сосны обыкновенной в географических культурах в Средней Сибири / Н.А. Кузьмина, **С.Р. Кузьмин** // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 2. – С. 31–39.

24. **Кузьмин, С.Р.** Связь комплекса показателей ассимиляционного аппарата с анатомическими характеристиками древесины побегов сосны обыкновенной / **С.Р. Кузьмин**, Т.В. Карпюк // Хвойные бореальной зоны. – 2018. – Т. XXXVI, – № 4. – С. 312–315.

25. Пахарькова, Н.В. Диагностика устойчивости представителей рода *Pinus* к периодическим повышением температуры в зимне-весенний период / Н.В. Пахарькова, Н.А. Кузьмина, Г.В. Кузнецова, **С.Р. Кузьмин** // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – Вып. 227. – С. 88–106.

26. **Кузьмин, С.Р.** Летучие вещества в хвое сосны обыкновенной с разной устойчивостью к грибным патогенам в условиях географических культур / **С.Р. Кузьмин**, А.А. Анискина, Г.В. Пермякова // Лесоведение. – 2020. – № 4. – С. 346–356. (Scopus)

27. **Кузьмин, С.Р.** Реакция ширины годичного кольца и доли поздней древесины у сосны обыкновенной на погодные условия в географических культурах / **С.Р. Кузьмин** // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 5 (377). – С. 64–80. (WOS)

28. **Кузьмин, С.Р.** Отбор перспективных климатипов сосны обыкновенной в географических культурах разных лесорастительных условий / **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина // Лесоведение. – 2020а. – № 5. – С. 451–465. (Scopus)

29. **Кузьмин, С.Р.** Лесосеменные районы сосны обыкновенной на основе оценки роста географических культур в Сибири / **С.Р. Кузьмин**, Н.А. Кузьмина // Сибирский лесной журнал. – 2020б. – № 6. С. 3–15.

30. Parfenova, E.I. Climate warming impacts on distributions of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seed zones and seed mass across Russia in the 21st century / E.I. Parfenova, N.M. Tchebakova, N.A. Kuzmina, **S.R. Kuzmin** // Forests. – 2021. – Vol. 12. – Iss. 8. – Article 1097. (WOS, Scopus)

31. **Кузьмин, С.Р.** Дифференциация климатипов лиственниц (*Larix* spp.) в географических культурах в лесостепи Средней Сибири / **С.Р. Кузьмин**, А.В. Рубцов, А.П. Барченков, Т.В. Карпюк // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2021. – № 56. – С. 170–188. (WOS, Scopus)